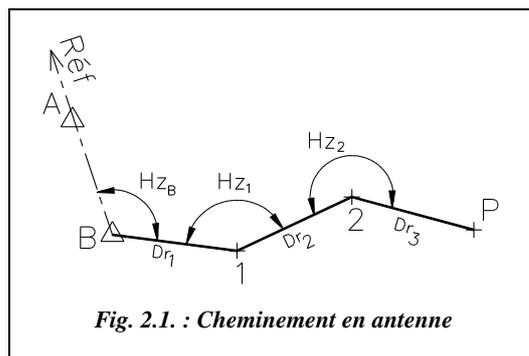


2

CHEMINEMENTS

1 CHEMINEMENTS PLANIMÉTRIQUES

Pour connaître les coordonnées Lambert (E , N) d'un point P, il faut s'appuyer sur des points existants : par exemple les points A et B de la figure 2.1. Si ces derniers sont trop loin du point P ou ne peuvent être visés directement en raison d'obstacles, on utilise des points intermédiaires pour arriver jusqu'au point cherché (points 1 et 2 de la figure 2.1.). On parle de parcours polygonal ou de cheminement.



Le calcul consiste en une suite de rayonnements : on calcule les coordonnées du point 1 à partir de celles de B, puis celles du point 2 à partir de celles du point 1 et ainsi de suite jusqu'au point P, c'est-à-dire :

$$\begin{cases} E_1 = E_B + Dr_1 \cdot \sin G_{B1} \\ N_1 = N_B + Dr_1 \cdot \cos G_{B1} \end{cases} \quad \begin{cases} E_2 = E_1 + Dr_2 \cdot \sin G_{12} \\ N_2 = N_1 + Dr_2 \cdot \cos G_{12} \end{cases} \quad \begin{cases} E_P = E_2 + Dr_3 \cdot \sin G_{2P} \\ N_P = N_2 + Dr_3 \cdot \cos G_{2P} \end{cases}$$

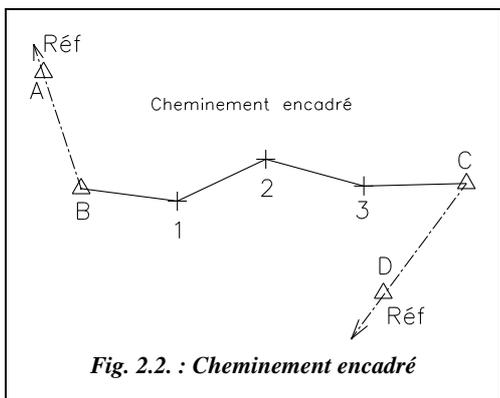
Pour faire ces calculs, il faut connaître les distances réduites à la projection Dr_j , déduites des longueurs horizontales D_{hj} mesurées sur le terrain, et les gisements G_{ij} de chaque tronçon.

Les distances D_{hj} peuvent être facilement mesurées sur le terrain en stationnant chaque sommet du parcours.

Les gisements G_{ij} peuvent être lus directement ou bien, plus généralement, être déduits de l'observation des angles H_{ij} entre les côtés (fig. 2.1.). Les lectures d'angles sont réalisées en stationnant tous les sommets du cheminement.

La nécessité d'un contrôle des mesures et des calculs oblige à refermer le parcours sur un couple de points connus pour contrôler l'écart angulaire et l'écart planimétrique dus aux erreurs de lectures (fig. 2.2., 2.3. et 2.4.).

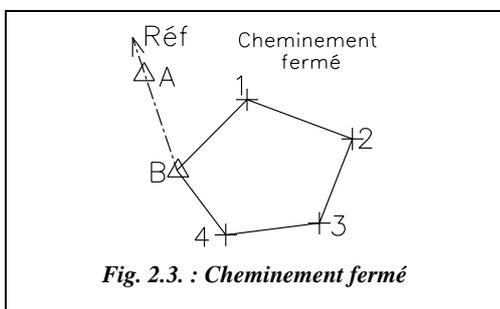
1.1 Terminologie



Si on mesure les angles entre côtés successifs H_{zj} , le cheminement est dit **goniométrique**.

Si on mesure directement les gisements des côtés, le cheminement est dit **décliné**.

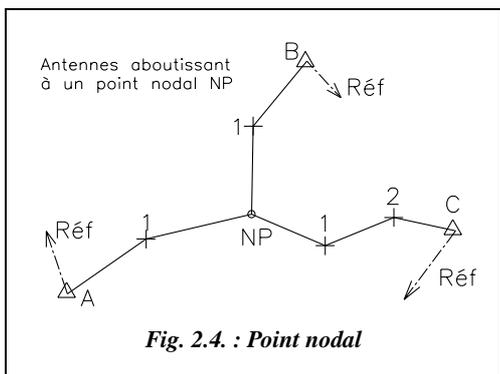
Un cheminement qui arrive sur un point connu différent du point de départ est **encadré** (fig. 2.2.).



Un cheminement qui revient sur son point de départ est **fermé** (fig. 2.3.).

Un cheminement ni fermé ni encadré est une **antenne** (fig. 2.1.).

Un **point lancé** (ou **point rayonné**) est un point hors cheminement, visé directement depuis un point connu.



Un **point nodal** est l'aboutissement d'au moins trois antennes (fig. 2.4.). Ces antennes sont appelées demi-cheminements.

Si les coordonnées des sommets sont calculées dans le système Lambert général, le cheminement est qualifié de **rattaché**.

S'il n'est pas rattaché, un cheminement est **indépendant**.

1.2 Méthodologie des mesures

1.2.1 Corrections et contrôles au niveau des calculs

Le contrôle des erreurs de lectures angulaires est réalisé en partant d'une direction connue et en refermant les lectures d'angles sur une direction connue (par exemple la direction CD de la figure 2.2.). Le contrôle des erreurs de mesure de longueurs qui est, dans la pratique, indissociable des erreurs de lectures angulaires, est effectué en partant d'un point connu et en refermant sur un point de coordonnées connues.

Dans le cas de cheminements rattachés au système général (système Lambert en France), il est nécessaire de faire plusieurs visées pour orienter les stations de départ et d'arrivée (calcul d'un *G0moyen* de station ; voir le tome 1, chapitre 3, paragraphe 6.) et améliorer ainsi la précision de l'orientation du cheminement. De plus, sur chaque sommet intermédiaire, une référence lointaine est utilisée pour effectuer un tour d'horizon (si c'est un point inconnu) ou pour vérifier l'orientation du cheminement (si c'est un point connu).

Remarque

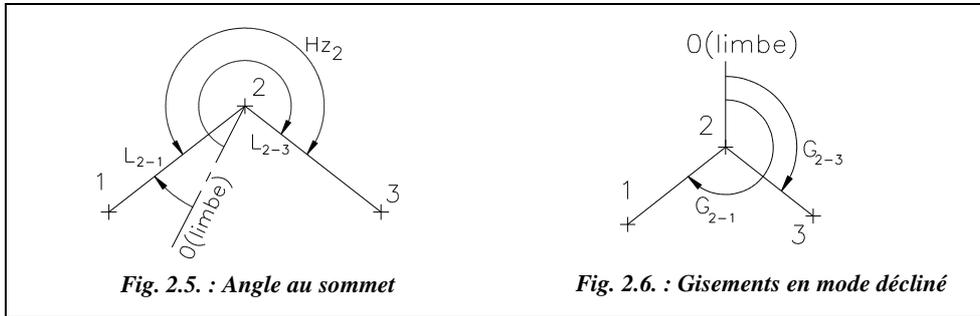
Les observations angulaires et linéaires sont ramenées au système de représentation plane (corrections de réduction à la projection, voir tome 1, chapitre 4, paragraphe 7. et corrections de dv , tome 1, chapitre 2, paragraphe 3.4.5.2. Ces dernières ne sont faites que pour des côtés supérieurs au kilomètre, donc très rarement en réalité).

1.2.2 Mesures sur le terrain

On mesure à chaque station l'angle horizontal H_z et la distance horizontale entre stations Dh . Pour obtenir la distance horizontale Dh , on mesure généralement la distance inclinée Di et l'angle zénithal V puis on en déduit : $Dh = Di \cdot \sin V$. Certains appareils donnent directement Dh , mais les valeurs de Di et V doivent être conservées puisqu'elles entrent dans le calcul des tolérances et permettent de calculer les dénivelées du parcours.

Les distances doivent ensuite être réduites à la projection par calcul de la distance réduite Dr à partir de la distance inclinée Di . Pour des parcours à longs côtés ou très fortes dénivelées, il faut mesurer l'altitude des stations par nivellement indirect ; pour des parcours peu dénivelés, on se contente d'une altitude moyenne des stations pour la réduction de Dh à Dr (voir tome 1, chap. 4). Dans un but d'amélioration de la précision, les lectures de distances sont réciproques.

En début et en fin de cheminement, l'orientation peut être effectuée par le calcul d'un *G0moyen* de station. De même, à chaque station intermédiaire, l'opérateur effectue un tour d'horizon (voir tome 1, chap. 3, § 4.3.4.) : en plus des visées arrière et avant permettant de calculer l'angle au sommet, il vise un point fixe lointain qui sert de référence au tour d'horizon, ceci permet de contrôler les lectures à chaque sommet.



Si l'on veut lire directement l'angle H_{z_j} (angle horizontal lu au sommet j), l'opérateur peut positionner le zéro du limbe sur le côté précédant la station. En pratique, il ne bouge pas le zéro du limbe après la mise en station (sa position est quelconque : voir fig. 2.5.) : il effectue les lectures angulaires sur le côté précédent puis sur le côté suivant et l'angle H_{z_j} en est déduit par différence.

Si l'on désire lire directement le gisement du côté suivant la station (en mode décliné), il faut afficher la valeur de son gisement sur le côté précédent (voir fig. 2.6. : on vise le point 1 depuis la station 2 et on affiche G_{2-1}).

1.3 Les angles horizontaux : calculs et compensations

Stationnons un sommet de la polygonale (fig. 2.7. : station au point j , le point précédent étant le point i et le point suivant le point k). On considère que le sens de graduation de l'appareil utilisé est le sens horaire qui est le plus courant en Europe.

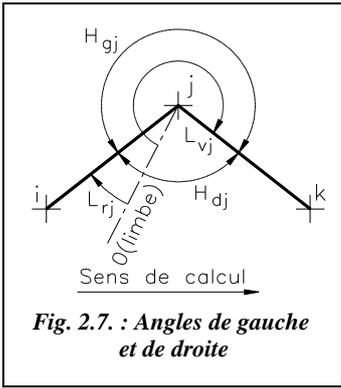
1.3.1 Angles de gauche ou de droite

C'est l'angle que l'on trouve à sa gauche (ou à sa droite) dans le sens de calcul, ce sens de calcul étant celui dans lequel on parcourt les sommets lors du calcul : il peut être différent du sens de parcours sur le terrain bien qu'il soit préférable de conserver le même.

Sur la figure 2.7., c'est le sens $(i-j-k)$.

En station au sommet j , on note :

- L_{r_j} la lecture arrière au sommet j sur le sommet précédent ;
- L_{v_j} la lecture avant au sommet j sur le sommet suivant ;
- H_{g_j} l'angle topographique de gauche (ou angle à gauche) dans le sens de calcul, H_{d_j} étant l'angle à droite.



On peut écrire les relations suivantes :

$$\begin{aligned} Hg_j &= Lv_j - Lr_j \\ Hd_j &= Lr_j - Lv_j \end{aligned}$$

Si le résultat est négatif, ajouter 400 gon. On remarque que : $Hd_j = 400 - Hg_j$.

1.3.2 Transmission des gisements

Ce calcul consiste à déterminer les gisements de tous les côtés du parcours à partir du gisement de la direction de référence et des angles mesurés aux sommets. Au sommet j (fig. 2.8.) et à partir de l'angle de gauche, on peut écrire :

$$G_{jk} = G_{ij} + H_{gj} + 200$$

Si l'on considère la figure 2.9., la formule devient :

$$G_{jk} = G_{ij} + H_{gj} - 200$$

Dans la pratique, on utilise l'une ou l'autre des formules et on ajoute 400 gon à tout résultat négatif, ou on retranche 400 gon à tout résultat supérieur à 400 gon.

La formule générale est donc :

$$G_{jk} = G_{ij} + H_{gj} \pm 200$$

Les gisements G et les angles H sont exprimés en gon.

Notez qu'ajouter ou retrancher 200 gon à un gisement revient à faire « demi-tour » donc le résultat est le même.

1.3.3 Transmission du G_0 de station

La transmission du G_0 de station est un autre mode de transmission des gisements basé sur le G_0 moyen de la station de départ.

Si on calcule un G_0 moyen de station au départ du cheminement, on peut calculer le G_0 de station en chaque sommet j par transmission du G_0 .

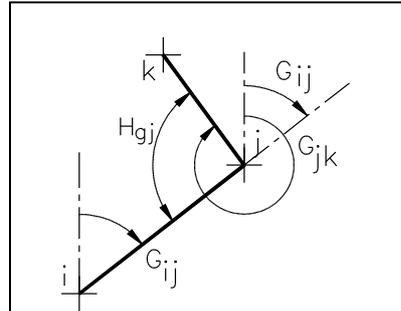


Fig. 2.8. : Transmission de gisement

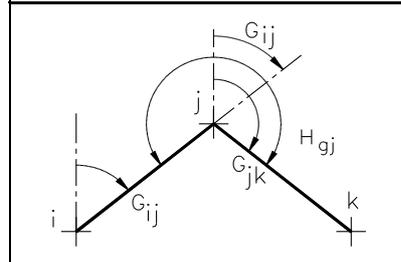


Fig. 2.9. : Transmission de gisement

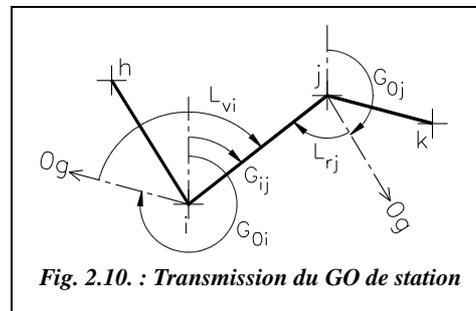


Fig. 2.10. : Transmission du G_0 de station

En station au sommet j (voir fig. 2.10.), on peut écrire : $GO_j = G_{ij} + (200 - Lr_j)$

Au sommet i , on peut écrire : $G_{ij} = GO_i + Lv_i - 400$

Donc : $G_{ij} = GO_i + Lv_i - Lr_j - 200$ Si le résultat est négatif, ajouter 400 gon.

S'il est supérieur à 400 gon, retrancher 400.

1.3.4 Fermeture angulaire d'un cheminement encadré

Les données sont : A, B, C et D, donc aussi G_{AB} noté G_d , et G_{CD} noté G_f .

On calcule de proche en proche tous les gisements de tous les côtés pour arriver au gisement d'arrivée G_{CD} connu qui sert de contrôle des erreurs de lecture d'angles (voir fig. 2.11.).

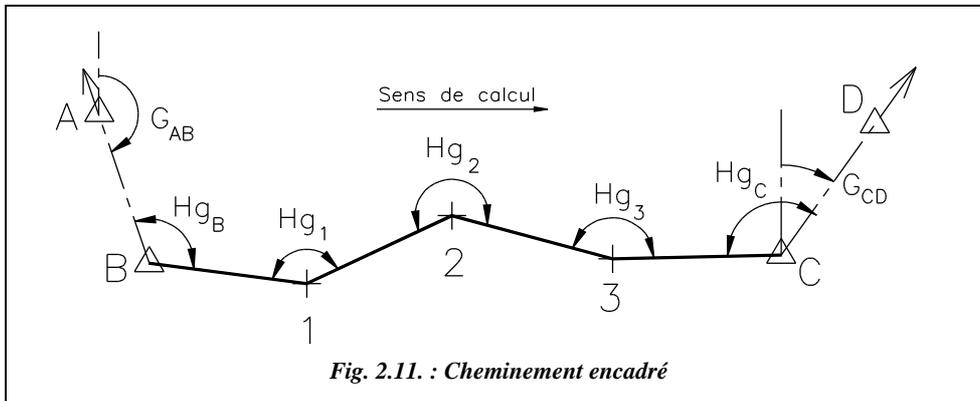


Fig. 2.11. : Cheminement encadré

On peut écrire : $G_{B1} = G_{AB} + Hg_B - 200$

$G_{1-2} = G_{B1} + Hg_1 - 200$

etc.

$G'_f = G_{3C} + Hg_C - 200$

G'_f est le gisement d'arrivée observé (G'_{CD})

Si l'on fait la somme de ces équations membre à membre, on obtient :

$$G'_f = G_d + \sum(Hg_j) - (n + 1) \cdot 200 \quad n \text{ étant le nombre de côtés de la polygonale.}$$

$\sum(Hg_j)$ représente la somme de tous les angles de gauche.

Si le résultat G'_f est négatif, ajoutez 400 gon autant de fois nécessaires.

L'erreur de fermeture angulaire fa est alors la différence entre ce gisement de fermeture observé et le gisement de fermeture théorique G_{CD} , noté G'_f , issu des coordonnées des points connus C et D.

$$fa = G'_f - G_f$$

1.3.5 Fermeture angulaire d'un cheminement avec transmission de $G0$

Pour simplifier le raisonnement et faciliter les calculs, on procède par transmission de gisement, cela permettra de ne mémoriser qu'une seule formule.

Sur le cheminement de la figure 2.12., la position du zéro du limbe à chaque station a été dessinée, de même que toutes les lectures angulaires. Pour se ramener à une transmission de gisement, il suffit de considérer que :

- le $G0$ de départ au point B est une visée sur un point B' fictif qui se trouverait dans l'alignement du zéro du limbe. La lecture arrière Lr_B de B sur B' est égale à 0. Donc l'angle de gauche en B a pour valeur $Hg_B = Lv_B - Lr_B = Lv_B$;
- le $G0$ d'arrivée au point C est une visée sur un point fictif C' . La lecture avant sur le point C' est égale à zéro, l'angle de gauche au point C vaut $Hg_C = Lv_C - Lr_C = -Lr_C$.

Le gisement de départ est alors :	$G_d = G0_B - 200$
Le gisement d'arrivée observé est :	$G'_f = (G0_B - 200) + \Sigma(Hg_i) - (n+1) \cdot 200$ avec $(Hg_B = Lv_B)$ et $(Hg_C = -Lr_C)$
Le gisement d'arrivée « exact » est :	$G_f = G0_C$
La fermeture angulaire est toujours :	$fa = G'_f - G_f$

Le schéma de la figure 2.12. ramène à un schéma classique. Comparez-le avec la figure 2.11.

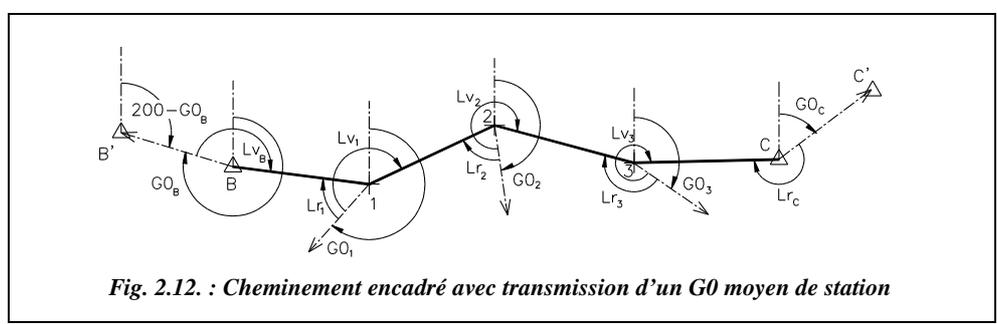


Fig. 2.12. : Cheminement encadré avec transmission d'un $G0$ moyen de station

1.3.6 Tolérance sur la fermeture angulaire

1.3.6.1 Tolérances théoriques

Soit σ_a l'écart type angulaire par station dépendant du théodolite utilisé ; on obtient comme tolérance angulaire Ta pour un cheminement de n côtés :

- pour un cheminement fermé : $Ta = 2,7 \cdot \sigma_a \cdot \sqrt{n}$
- pour un cheminement encadré : $Ta = 2,7 \cdot \sigma_a \cdot \sqrt{n+1}$

Par exemple, pour un parcours fermé de six stations mesuré au moyen d'un T16 (valeur usuelle de l'écart type angulaire : $\sigma = \pm 2,5$ mgon), on a : $\sigma_a = \pm 2,5 \cdot \sqrt{2}$ (deux lectures angulaires pour un angle) donc $Ta = \pm 9,5 \cdot \sqrt{6} = \pm 23$ mgon.

1.3.6.2 Tolérances applicables aux levés à grande échelle

L'arrêté interministériel du 21 janvier 1980 donne les tolérances suivantes :

Tolérances en mgon		Canevas de précision	Canevas ordinaire
Cheminement à longs côtés du canevas d'ensemble	Fermé	$1,4\sqrt{n}$	$1,4\sqrt{n}$
	Encadré	$\sqrt{2 + 2(n+1)}$	$\sqrt{50 + 2(n+1)}$
Canevas polygonal	Fermé	$6\sqrt{n}$	$10\sqrt{n}$
	Encadré	$\sqrt{12,96 + 36(n+1)}$	$\sqrt{330 + 100(n+1)}$

n : nombre de côtés du cheminement.

L'exemple précédent conduit à une tolérance $Ta = 10 \cdot \sqrt{6} = 24,5$ mgon ; on peut donc considérer que le T16 convient aux mesures en canevas ordinaire.

Attention : les formules de ce tableau ne figurent pas toutes dans l'arrêté de janvier 1980 ; celles concernant les cheminements fermés ont été déduites des considérations du paragraphe 2.3.6.3. suivant ; ces tolérances sont le plus souvent indicatives car il reste rare d'avoir à effectuer des cheminements fermés pour des levés à grande échelle pour les services publics.

1.3.6.3 Justification de ces tolérances

Les erreurs de mesures angulaires dans un cheminement complet peuvent être décomposées en deux parties :

- une erreur sur chaque lecture à chaque station ;
- une erreur d'orientation au départ et à l'arrivée qui sera fonction de la précision sur la connaissance des points d'appui du cheminement.

On appelle t_1 la tolérance sur les orientations de départ et d'arrivée et t_2 , la tolérance sur la lecture des angles du cheminement.

Les tolérances sont de la forme suivante (voir tableau) : $T^2 = 2.(t_1)^2 + (n+1).(t_2)^2$

n est le nombre de côtés du cheminement ; il y a donc $(n+1)$ angles à mesurer.

Les lignes 2 et 4 du tableau sont consacrées aux cheminements fermés qui ne seraient pas orientés au départ ni à l'arrivée. Dans ce cas, le terme en t_1 est nul : on retrouve les formules des cheminements encadrés avec $t_1 = 0$ et il y a autant d'angles que de côtés : n .

	t_1 (orientation)	t_2 (angles du cheminement)
Canevas d'ensemble		
Précision	$\sqrt{2}/2 = 1$ mgon car $T(x) = 4$ cm sur points d'appui et visées d'orientation de l'ordre de 2,5 km	1,4 mgon (1 mgon sur une direction) ⁽²⁾
Ordinaire	$\sqrt{50}/2 = 5$ mgon car $T(x) = 20$ cm et visées d'orientation de 2,5 km ⁽¹⁾	1,4 mgon (1 mgon sur une direction) ⁽²⁾
Canevas polygonal		
Précision	$\sqrt{12,96}/2 \approx 2,54$ mgon car $T(x) = 4$ cm sur les points d'appui et visées d'orientation de l'ordre de 1 km	6 mgon (4,2 mgon sur une direction)
Ordinaire	$\sqrt{330}/2 \approx 12,8$ mgon car $T(x) = 20$ cm sur les points d'appui et visées d'orientation de l'ordre de 1 km	10 mgon (7 mgon sur une direction) ⁽³⁾

(1) On remarque que si l'on applique la formule donnant la tolérance sur l'écart d'orientation en une station (§ 5.2.8.), on doit effectivement prendre $Dm = 2,5$ km (et non 3) et $n = 2$.

(2) L'erreur admise sur un des angles du cheminement est 1,4 mgon ; cette valeur exige pratiquement le recours au centrage forcé (voir chap 1, § 1.3.5.2.).

(3) Les observations doivent être faites avec un appareil lisant le mgon (voir chap 1, § 1.4.2.).

1.3.7 Compensation angulaire

C'est l'opération qui consiste à répartir l'écart de fermeture angulaire sur tous les angles observés. On ne peut compenser angulairement un cheminement que si l'écart de fermeture angulaire est inférieur à la tolérance réglementaire. Si ce n'est pas le cas, la manipulation doit être reprise en entier car il s'agit d'une faute.

La compensation angulaire est la quantité à répartir sur les différentes mesures ; c'est donc l'opposé de la fermeture angulaire :

$$Ca = -fa$$

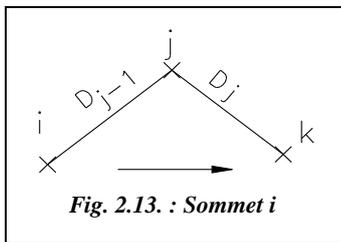
Suivant le type de cheminement effectué et suivant la valeur de la fermeture angulaire, on compense de deux manières différentes.

1.3.7.1 Compensation proportionnelle au nombre de stations

Si les distances de visées sont homogènes, on répartit l'écart de fermeture fa de manière égale sur chaque station. Donc, pour un cheminement de n côtés, la compensation angulaire C_j sur chaque lecture est :

$$C_j = \frac{Ca}{n + 1}$$

1.3.7.2 Compensation proportionnelle à l'inverse des distances de visées



Si les distances de visée ne sont pas homogènes, on répartit l'écart de fermeture fa en considérant que l'on commet plus d'erreur en angle sur une visée courte que sur une visée longue. Comme à chaque station intervient la distance de la visée arrière et celle de la visée avant (voir fig. 2.13.), on fait intervenir des poids p_j tels que, au sommet j :

$$p_j = \frac{1}{D_{j-1}} + \frac{1}{D_j}$$

D_j et D_{j-1} sont exprimées en kilomètre.

La compensation angulaire C_j sur chaque lecture est alors :

$$C_j = \frac{Ca}{\sum p_j} \cdot p_j$$

Dans le cas d'une orientation par *G0moyen* de station, la distance de cette visée d'orientation est considérée comme infinie.

Remarque

La compensation est effectuée avec les mêmes décimales que les lectures sur le terrain (cgon, mgon, dmgon). L'écart fa est généralement réparti sur les angles H_{z_j} , le cumul est alors automatique. Si cet écart est réparti sur les gisements observés, il ne faut pas oublier de cumuler les répartitions intermédiaires.

Une vérification des calculs est de retrouver comme gisement d'arrivée le gisement de fermeture théorique (voir exemples de calcul complet au paragraphe 1.5.).

1.4 Coordonnées rectangulaires des sommets

Connaissant le gisement et la longueur de chaque côté du cheminement, on calcule à partir des coordonnées du point de départ les coordonnées des autres sommets par rayonnements successifs.

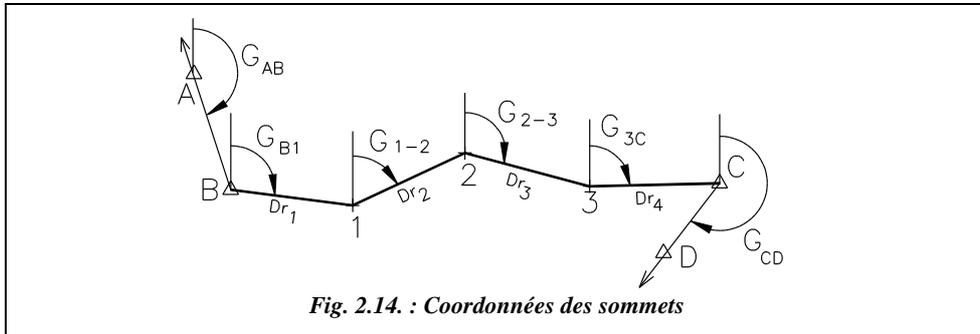


Fig. 2.14. : Coordonnées des sommets

$$E_1 = E_B + Dr_1 \cdot \sin G_{B1}$$

$$E_2 = E_1 + Dr_2 \cdot \sin G_{1-2}$$

etc.

$$E'_C = E_3 + Dr_4 \cdot \sin G_{3C}$$

Si l'on fait la somme de toutes ces équations membre à membre, on obtient en abscisses :

$$E'_C = E_B + \sum(Dr_j \cdot \sin G_{ij})$$

De même en ordonnées : $N'_C = N_B + \sum(Dr_j \cdot \cos G_{ij})$

On note $\Delta E_{ij} = Dr_j \cdot \sin G_{ij}$ et $\Delta N_{ij} = Dr_j \cdot \cos G_{ij}$. Ces termes correspondent en effet à la différence de coordonnées en E et en N entre le point i et le point j .

On obtient ainsi les coordonnées observées du point d'arrivée C' :

$$\begin{cases} E'_C = E_B + \sum(\Delta E_{ij}) \\ N'_C = N_B + \sum(\Delta N_{ij}) \end{cases}$$

1.4.1 Fermeture planimétrique

Les coordonnées du point d'arrivée du cheminement (point C , fig. 2.14.) étant connues, on peut en déduire une erreur de fermeture planimétrique du cheminement due au cumul des erreurs de lectures angulaires et des erreurs de mesures de distances.

L'erreur de fermeture en X (repère local) est :

$$f_X = X'_C - X_C = X_B + \sum(\Delta X) - X_C$$

L'erreur de fermeture en Y (repère local) est :

$$f_Y = Y'_C - Y_C = Y_B + \sum(\Delta Y) - Y_C$$

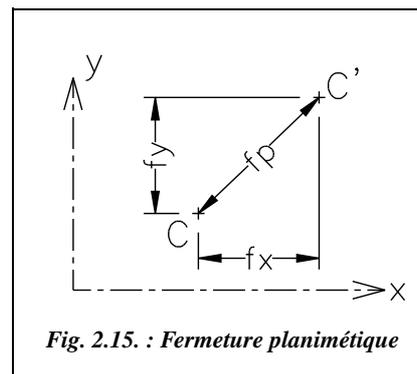


Fig. 2.15. : Fermeture planimétrique

Ces fermetures en X et en Y permettent de calculer une fermeture planimétrique f_p qui est la distance séparant le point C' issu des

mesures de terrain du point C réel ; on parle de vecteur de fermeture (voir fig. 2.15.). La longueur de ce vecteur s'exprime par :

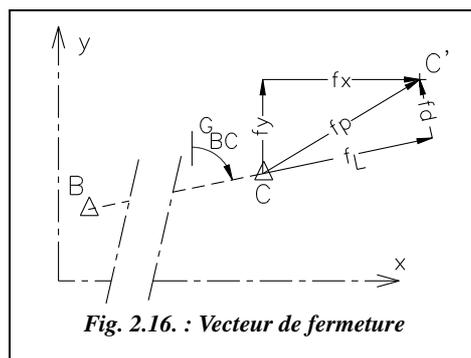
$$f_p = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$$

Si le cheminement BC est « tendu » (angles du cheminement proches de 200 gon), le vecteur de fermeture f_p peut être décomposé en :

- une fermeture en longueur f_L suivant la direction BC (due uniquement aux imprécisions sur les côtés).
- Une fermeture en direction f_D perpendiculairement à BC (due uniquement aux imprécisions sur les angles).

Un cheminement est « tendu » s'il vérifie :

$$\sum D_j < 1,5 \cdot L_T$$



Avec L_T : distance entre la station de départ et la station d'arrivée.

D_j : longueur de chaque côté j du cheminement.

Un cheminement non tendu est appelé « infléchi ».

On peut aussi calculer f_L et f_D en fonction de f_x et f_y . On appelle G le gisement de la direction générale du cheminement (ici BC) ; on obtient alors les composantes f_L et f_D par rotation de repère d'angle $(100 - G)$, d'où les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} f_L &= f_x \cdot \sin G + f_y \cdot \cos G \\ f_D &= f_y \cdot \sin G - f_x \cdot \cos G \end{aligned}$$

Ces deux composantes du vecteur de fermeture n'ont de signification que dans le cas d'un cheminement « tendu » ; dans les autres cas, les deux composantes ne sont pas dissociables l'une de l'autre puisque les erreurs en longueur et en angle influent ensemble sur l'erreur planimétrique finale.

1.4.2 Tolérance sur la fermeture planimétrique

1.4.2.1 Tolérances théoriques pour un cheminement encadré tendu

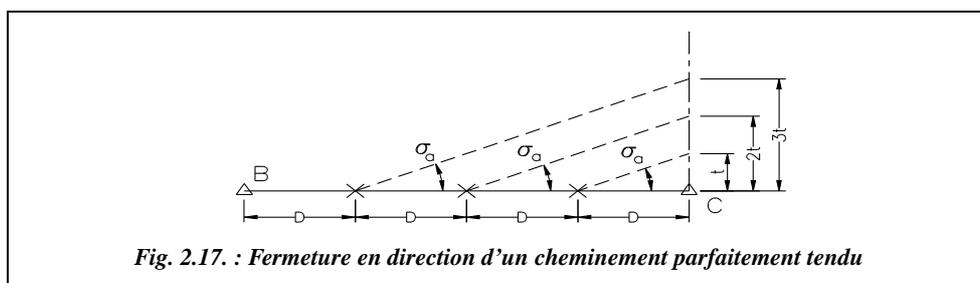
Considérons un cheminement parfaitement tendu de n côtés égaux (voir fig. 2.17.).

- La tolérance de fermeture en longueur est : $T_L = 2,7 \sigma_L \sqrt{n}$

σ_L est l'écart type sur la mesure de longueur d'un côté.

T_L et σ_L sont donnés en mètre.

On étend cette tolérance aux cheminements imparfaitement tendus.



- La tolérance de fermeture en direction se justifie ainsi : une erreur angulaire σ_a à la dernière station provoque un écart transversal $t = D \cdot \sigma_{a_{rad}}$ sur le point d'arrivée. Une erreur angulaire σ_a à chaque station provoque donc un écart transversal total t_T de :

$$t_T = D(\sigma_{a_{rad}})\sqrt{1^2 + 2^2 + \dots + n^2}$$

$$t_T = D(\sigma_{a_{rad}})\sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{6}}$$

Si l'on appelle L_i la distance du point d'arrivée à chaque sommet du parcours, on obtient :

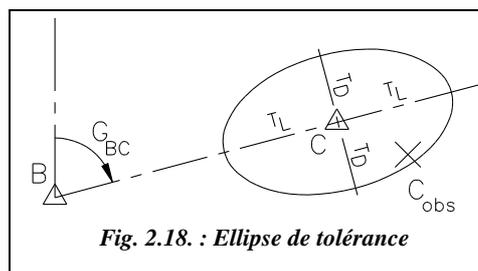
$$\sum_{i=1}^{i=n} L_i^2 = D^2 + (2D)^2 + \dots + (nD)^2 = D^2 \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}$$

On obtient donc l'écart maximal théorique (tolérance T_D) :

$$T_D = 2,7(\sigma_{a_{rad}})\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} L_i^2}$$

On étend cette tolérance aux cheminements non parfaitement tendus.

Dans le cadre des cheminements tendus, on peut construire l'ellipse de tolérance de la figure 2.18. : son grand axe de longueur $2.T_L$ est placé sur la direction générale du cheminement et son petit axe a pour valeur $2.T_D$. Le point d'arrivée observé (C_{obs}) doit se situer à l'intérieur



de cette ellipse pour satisfaire aux tolérances. Dans la pratique, on remplace cette ellipse

par un cercle de rayon $T_p = \sqrt{T_L^2 + T_D^2}$.

Il faut aussi tenir compte de l'incertitude σ_x sur la distance entre points d'appui, ce qui donne une tolérance $T_L = 2,7\sqrt{\sigma_x^2 + n\sigma_L^2}$.

Finalement, on obtient :

$$T_p = 2,7 \sqrt{\sigma_x^2 + n\sigma_L^2 + \sigma a_{rad}^2 \cdot \sum_{i=1}^{i=n} Li^2}$$

T_p , L_i , σ_x et σ_L sont exprimés en m et σa en radian.

En canevas de précision, T_x a pour valeur ± 4 cm ; cela donne un écart type $\sigma_x = \pm 4 / 2,7 = \pm 1,5$ cm.

Application

Soit un cheminement parfaitement tendu comportant six côtés de 500 m chacun. L'appareil utilisé est un théodolite T2 ($\sigma = \pm 5$ dmgon, valeur usuelle), chaque angle étant observé avec quatre paires de séquences ($\sigma a = \pm 5 \cdot \sqrt{2} / \sqrt{4} = \pm 3,5$ dmgon). Chaque côté est mesuré quatre fois avec un écart type de 1 cm à chaque mesure donc $\sigma_L = \pm 1 / \sqrt{4}$ cm = $\pm 0,5$ cm. On obtient une tolérance finale sur la fermeture planimétrique de $T_p = \pm 8,8$ cm.

1.4.2.2 Tolérances théoriques pour un cheminement encadré infléchi

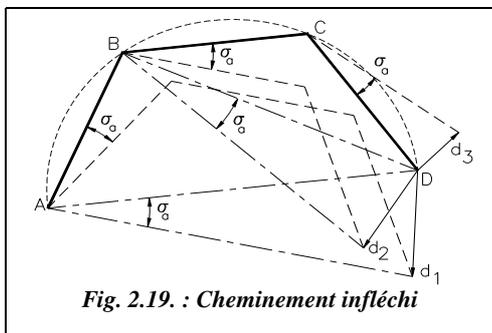
Considérons un cheminement infléchi de n côtés égaux (voir fig. 2.19.).

- **La tolérance de fermeture en longueur** est égale à celle du cheminement tendu et vaut $T_L = 2,7\sigma_L\sqrt{n}$.
- **La tolérance de fermeture en direction** est déterminée en raisonnant sur un cheminement particulier de n côtés égaux dont les sommets sont répartis sur un demi-cercle (voir fig. 2.19.) ; on aboutit à une formulation équivalente à celle vue précédemment pour les cheminements tendus.

Une erreur σa au point A donne un déplacement d_1 du point D.

Une erreur σa au point B donne un déplacement d_2 du point D.

Une erreur σa au point C donne un déplacement d_3 du point D.



Le déplacement final est :

$$d = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2}$$

On peut écrire :

$$d_1 = AD \cdot \sigma a_{rad}$$

$$d_2 = BD \cdot \sigma a_{rad}$$

$$d_3 = CD \cdot \sigma a_{rad}$$

On obtient donc :

$$d = \sigma a_{\text{rad}} \sqrt{AD^2 + BD^2 + CD^2}.$$

De plus, $CD = AB$ et comme AD est le diamètre du cercle, on obtient $AD^2 = AB^2 + BD^2$.

Finalement, $d = \sigma a_{\text{rad}} \sqrt{2AB^2}$ pour un cheminement de trois côtés. De proche en proche, pour un cheminement de n côtés, on obtient une tolérance T_D de :

$$T_D = 2,7 \sigma a_{\text{rad}} \cdot AB_m \sqrt{\frac{n+1}{2}} \text{ ou encore : } T_D = 2,7 \sigma a_{\text{rad}} \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} L_i^2}.$$

L_i étant la distance du point d'arrivée à chaque point du cheminement (ici en mètre).

On obtient une expression finale de la tolérance de fermeture planimétrique identique au cas précédent des cheminements tendus (voir § 1.4.2.1.). Ce résultat est étendu à tous les cheminements encadrés.

1.4.2.3 Tolérances théoriques pour un cheminement fermé

Considérons un cheminement fermé de n côtés égaux (fig. 2.20.).

- **La tolérance de fermeture en longueur** est identique à celle du cheminement tendu et vaut $T_L = 2,7 \sigma_L \sqrt{n}$.
- **La tolérance de fermeture en direction** s'obtient en raisonnant sur un cheminement fermé particulier de n côtés égaux dont les sommets sont répartis sur un cercle ; on retrouve la formule obtenue pour les cheminements encadrés.

Soit le cheminement fermé ABCD qui est un carré de diagonale AC (fig. 2.20.) :

- une erreur σa au point A ne donne aucun déplacement du point A ;
- une erreur σa au point B donne un déplacement d_1 du point A ;
- une erreur σa au point C donne un déplacement d_2 du point A ;
- une erreur σa au point D donne un déplacement d_3 du point A.

En suivant le même raisonnement que précédemment, on obtient :

$$d = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2}$$

$$d = \sigma a_{\text{rad}} \sqrt{AB^2 + CA^2 + DA^2}$$

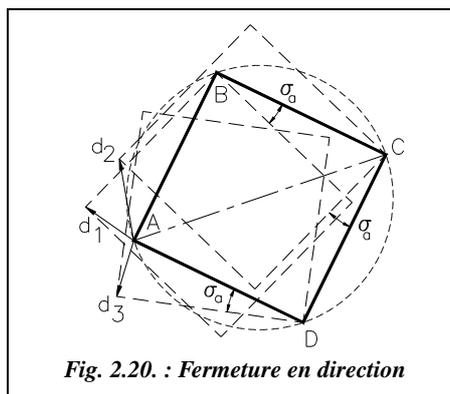


Fig. 2.20. : Fermeture en direction

$$\text{Donc : } T_D = 2,7 \sigma_{a_{rad}} \sqrt{\sum_{i=2}^{i=n} L_i^2}$$

On retrouve la même expression que pour les cheminements encadrés, mis à part l'erreur portant sur la connaissance de la distance entre points d'appui qui n'intervient plus. T_p , σ_x et σ_L sont donnés en mètre et σ_a en radian :

$$T_p = 2,7 \sqrt{n\sigma_L^2 + \sigma_{a_{rad}}^2 \cdot \sum_{i=2}^{i=n} L_i^2}$$

1.4.2.4 Tolérances réglementaires applicables aux levés à grande échelle

On applique les valeurs suivantes (arrêté interministériel du 21 janvier 1980) à tout cheminement encadré (tendu ou infléchi) ou fermé.

	Canevas de précision	Canevas ordinaire
Cheminement à longs côtés du canevas d'ensemble		
Fermé	$\sqrt{16n + 5 \sum_{i=2}^{i=n} L_i^2}$	$\sqrt{16n + 40 \sum_{i=2}^{i=n} L_i^2}$
Encadré	$\sqrt{16 + 16n + 5 \sum_{i=1}^{i=n} L_i^2}$	$\sqrt{400 + 16n + 40 \sum_{i=1}^{i=n} L_i^2}$
Canevas polygonal		
Fermé	$\sqrt{16n + 160 \sum_{i=1}^{i=n} L_i^2}$	$\sqrt{160L + 260 \sum_{i=1}^{i=n} L_i^2 + 30L}$
Encadré	$\sqrt{16 + 16n + 160 \sum_{i=1}^{i=n} L_i^2}$	$\sqrt{400 + 160L + 260 \sum_{i=1}^{i=n} L_i^2 + 30L}$

Les tolérances sont données en centimètre. n est le nombre de côtés du cheminement.

L_i est la distance en kilomètre de chaque sommet au point d'arrivée ; L est la longueur totale du cheminement en kilomètre.

Attention : certaines des tolérances données dans le tableau précédent ne sont pas indiquées sur l'arrêté de janvier 1980 (en particulier le canevas polygonal fermé) ; elles ont été déduites des considérations du paragraphe 1.4.2.3. Si l'on applique ces formules à

l'exemple du paragraphe 1.7.1. (en négligeant le terme systématique $30.L$), on obtient des tolérances plus importantes en précision qu'en ordinaire. Cela vient du fait que les côtés étant petits, le terme prépondérant devient $16.n$, ce qui permet de rappeler que ces tolérances de l'arrêté de janvier 1980 ne s'appliquent qu'à certains types de travaux (levés à grande échelle entrepris par les services publics) et que dans tous les autres cas, elles ne sont qu'indicatives : la tolérance de chantier reste fixée par le cahier des charges.

1.4.2.5 *Justification de ces tolérances*

Les tolérances du tableau se présentent presque toutes sous la forme :

$$T_p^2 = T_x^2 + (T_L \sqrt{n})^2 + T_\alpha^2 \sum L_i^2$$

T_x est la tolérance sur l'erreur en distance entre points d'appuis (4 cm en canevas de précision et 20 cm en canevas ordinaire).

T_L est la tolérance sur la mesure de longueur d'un côté du cheminement, $T_L \cdot \sqrt{n}$ pour n côtés.

T_α (radian) est la tolérance sur la mesure des angles du cheminement (après compensation angulaire ; voir la démonstration au paragraphe 1.4.2.1.).

$\sum L_i^2$ est la somme des carrés des distances de chaque sommet au point d'arrivée.

- Terme T_x : pour les cheminements fermés, T_x n'est pas pris en compte puisque la fermeture d'un tel cheminement est indépendante du point de départ. Pour les cheminements encadrés, T_x vaut 16 cm (4^2) en canevas de précision ou bien 400 cm (20^2) en canevas ordinaire.
- Terme T_L : pour des côtés d'une longueur moyenne de 1 km, la tolérance sur l'écart entre deux mesurages indépendants est de $(3 + L_{\text{km}})$ quel que soit le canevas. Cela donne 4 cm pour une visée de 1 km, d'où le terme $16 \cdot n = (4 \sqrt{n})^2$.

En canevas polygonal ordinaire, la formule diffère de son homologue du canevas d'ensemble et de celle du canevas polygonal de précision :

- par le terme en n sous le radical, qui est remplacé par un terme en $L (\sqrt{160L})$ car les mesurages des côtés effectués avec les moyens traditionnels sont susceptibles d'une erreur accidentelle proportionnelle à la racine carrée de la longueur et évaluée à $\sqrt{160} \approx 12,6$ cm pour 1 km ou $(12,6 / \sqrt{10}) \approx 4$ cm pour 100 m.
- par le terme $30.L$ hors radical : on a tenu compte de la possibilité d'une erreur systématique (donc hors radical) sur le mesurage des longueurs due aux erreurs systématiques de mesurage à la chaîne (étalonnage, dilatation, etc.). Ce terme doit être négligé si l'on utilise un distancemètre.
- Terme T_α : le coefficient devant le terme $\sum L_i^2$ est égal à $(2,47 \cdot T_\alpha^2)$ donc T_α prend les valeurs suivantes :
 - 1,4 mgon pour les cheminements à longs côtés du canevas de précision, 4 mgon pour ceux du canevas ordinaire ;

- 8 mgon pour les cheminements du canevas polygonal de précision et 10 mgon pour ceux du canevas ordinaire.

Le terme 2,47 est un facteur multiplicatif, $(10^{-3} \cdot 10^5 \cdot \pi / 200)^2 \approx 2,47$.

La tolérance finale est la composition quadratique des trois tolérances élémentaires. Elle est donnée en centimètre alors que les distances L_i sont en kilomètre, T_α est en radian.

1.4.3 Ajustement planimétrique

L'ajustement planimétrique est le calcul qui consiste à répartir les fermetures planimétriques sur les mesures du cheminement. On ne peut procéder à cet ajustement que si la longueur du vecteur de fermeture est inférieure à la tolérance réglementaire.

Il existe plusieurs méthodes d'ajustement : nous ne développons que la plus fréquemment employée dans les calculs manuels.

La compensation à effectuer sur les ΔX est l'opposée de la fermeture en X

$$C_X = -f_X$$

La compensation à effectuer sur les ΔY est l'opposée de la fermeture en Y

$$C_Y = -f_Y$$

La répartition de ces compensations peut être effectuée de deux manières différentes :

- **Si les côtés sont de longueur homogène**, on répartit C_X et C_Y de manière égale sur tous les côtés, donc sur le côté j :

$$C_{Xj} = \frac{C_X}{n} \text{ et } C_{Yj} = \frac{C_Y}{n}$$

- **Si les côtés ne sont pas homogènes**, on répartit C_X et C_Y proportionnellement à la longueur de chaque côté (considérant logiquement que plus le côté est long, moins il est précis), donc sur le côté j :

$$C_{Xj} = \frac{C_X}{\sum_{i=1}^n D_i} \cdot D_j \text{ et } C_{Yj} = \frac{C_Y}{\sum_{i=1}^n D_i} \cdot D_j$$

Ces compensations sont calculées avec la précision des données. Un contrôle des calculs est de retrouver pour le point d'arrivée observé les coordonnées réelles.

1.5 Exemples de calcul

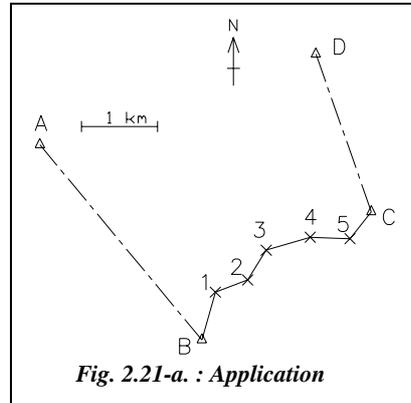
1.5.1 Polygone classique

Considérons la polygone représentée sur la figure 2.21-a. ; il est demandé de la calculer à partir des données des tableaux suivants.

Les indications de lignes et de colonnes en tête de ces deux tableaux serviront à la création du tableau de calcul sur Excel.

Les côtés du parcours étant inférieurs au kilomètre, les corrections de $d\alpha$ sur les lectures angulaires ne sont pas nécessaires.

Les coordonnées des points d'appui sont les suivantes :



	A	B	C	D	E
1		E (m)	N (m)		
2	A	981 030,06	156 888,22	$G_{AB}(\text{gon}) =$	155,9074
3	B	983 156,00	154 326,00	$D_{AB}(\text{m}) =$	3329,35
4	C	985 380,62	156 009,89	$G_{CD}(\text{gon}) =$	378,4731
5	D	984 652,96	158 079,17	$D_{CD}(\text{m}) =$	2193,49

Les mesures effectuées sur le terrain sont résumées dans le tableau ci-après :

	A	B	C	D
7	Sta	Dr	Lr	Lv
8		(m)	(gon)	(gon)
9				
10	B	653,113	65,4578	127,0384
11	1	453,524	87,6986	347,1859
12	2	460,558	214,5669	372,9000
13	3	602,247	147,5411	394,2554
14	4	522,817	0,9868	221,2260
15	5	451,441	12,3367	152,6369
16	C		317,9984	53,8993

Remarque

Cet exercice est uniquement un exemple de calcul et non un cas réel, parce que les fermetures (angulaires et planimétriques) ont été vérifiées avec les tolérances d'un

canevas polygonal, alors que la longueur des côtés correspondant à un cheminement à longs côtés du canevas d'ensemble.

◆ **Écriture d'un tableau**



Un tableau plus complet que celui proposé ci-dessous se trouve sur le cédérom sous le nom POLYGO.XLS. Il permet, dans sa version complète, de calculer une polygonale ainsi qu'un rayonnement à partir d'une des stations de la polygonale.

	A	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
7	St.	Lv - Lr	Poids	Ca	Gisem.	Delta E	C _E	Delta N	C _N	Coordonnées (m)		Li ²
8		gon	km ⁻¹	dmgon	gon	m	mm	m	mm	E	N	km ²
9				Gd = 155,9074								
10	B	61,5806	1,8	8	17,4887	177,170	-17	628,623	-8	983 156,00	154 326,00	7,8
11	1	259,4873	3,7	16	76,9776	424,190	-12	160,458	-6	983 333,15	154 954,62	5,3
12	2	158,3331	4,4	18	35,3126	242,566	-12	391,504	-6	983 757,33	155 115,07	3,4
13	3	246,7143	3,8	16	82,0285	578,409	-15	167,763	-7	983 999,89	155 506,57	2,2
14	4	220,2392	3,6	15	102,2692	522,485	-13	-18,632	-6	984 578,28	155 674,32	0,8
15	5	140,3002	4,1	17	42,5711	279,880	-12	354,212	-6	985 100,75	155 655,68	0,2
16	C	135,9009	2,7	11	378,4731					985 380,62	156 009,89	0,0
17												
18	S		24,1	102		2224,700	-80	1683,929	-39			19,6
19	L=	3143,700	fa =	-10,2	mgon		f _E :	8,0	cm	Tolérances :		
20		Tol.	préc.	16,3	mgon		f _N :	3,9	cm	précision	57,1	cm
21			ordi.	32,1	mgon		f _p :	8,9	cm	ordinaire	77,5	cm

Ouvrez une nouvelle feuille puis inscrivez les données dans les cases A1 à C5 et A7 à D16 (voir tableaux des données à la page précédente).

Inscrivez les textes de présentation du tableau en lignes 7 et 8 et dans toutes les autres cases contenant du texte.

Pour le calcul des gisements et des distances de départ et d'arrivée, inscrivez les formules suivantes :

En case E2, calcul du gisement de départ : reprenez la formule vue au tome 1, chapitre 3, § 5.2.4. (adaptez les références : A1 devient B2, A2 devient C2, B1 devient B3, B2 devient C3).

En case E3, calcul de la distance AB : = RACINE((B2-B3)^2+(C2-C3)^2).

Sélectionnez les cases E2 et E3 puis menu EDITION / COPIER. Déplacez le curseur en E4 puis COLLER.

Vous devez obtenir les gisements et distances donnés à la page précédente.

Remarque

Une autre manière de calculer un gisement est d'utiliser la programmation d'Excel en Visual Basic ou d'écrire une macrofonction. Par exemple, la fonction GISEMENT() est ajoutée au jeu de fonctions d'Excel par le tableau MENUPO.XLS du cédérom.

– Longueur L du cheminement :

Inscrivez en case E19 (ou B18) : = SOMME(B10:B15).

– Pour le calcul de la fermeture et de la tolérance de fermeture angulaire, inscrivez les formules suivantes :

En case E10 : = si(D10 – C10 < 0 , D10 – C10 + 400 , D10 – C10) , recopiez ensuite vers le bas jusqu'à E16.

Poids des première et dernière visées, en case F10 : =1000*(1/E3+1/B10), en case F16 : =1000*(1/E5+1/B15).

Poids des autres visées, en case F11 : = 1000*(1/B10 + 1/B11) , recopiez ensuite vers le bas jusqu'à F15.

Somme des poids, entrez en case F18 : = SOMME(F10:F16).

Fermeture angulaire, en case G19 : = (E2 + SOMME(E10:E16) – 5*200 – E4) *1000 (le coefficient 5 a été déterminé après quelques essais).

Pour le calcul des tolérances, entrez en case G20 : = RACINE(12.96+36*7) , et en case G21 : = RACINE(330+100*7).

– Calcul des gisements définitifs

En case H9, entrez : = E2 ;

En case H10, entrez : = SI (H9 + E10 – G\$19 / F\$18 * F10 < 200 , H9 + E10 – G\$19 / F\$18 * F10 + 200 , H9 + E10 – G\$19 / F\$18 * F10 – 200).

Recopiez vers le bas jusqu'à H16 (s'il n'y a pas eu d'erreur, on doit retrouver le gisement d'arrivée G_{CD}).

– Calcul de la fermeture planimétrique

Delta E, en case I10 : = B10 * sin(H10 * PI() / 200) , recopiez vers le bas jusqu'à I15 ;
Delta N, en case K10 : = B10 * cos(H10 * PI() / 200) , recopiez vers le bas jusqu'à K15 ;

Fermeture en Est en cm, en case K19 : = (B3 + SOMME(I10:I15) – B4) *100.

Fermeture en Nord en cm, en case K20 : = (C3 + SOMME(K10:K15) – C4) *100.

Fermeture planimétrique en cm, en case K21 : = RACINE(K19^2+K20^2).

– Compensations en Est et Nord puis coordonnées définitives des points

Compensation en Est en mm, entrez en case J10 : = – K\$19 / E\$19 * B10 * 10 , recopiez vers le bas jusqu'à J15.

Compensation en Nord en mm, entrez en case L10 : = – K\$20 / E\$19 * B10 * 10 , recopiez vers le bas jusqu'à L15.

Coordonnée Est et Nord, entrez en case M10 : = B3 , et en case N10 : = C3.

De même, entrez en case M11 : = M10 + I10 + J10/1000 , et en case N11 : = N10 + K10 + L10/1000. Recopiez ensuite M11 et N11 vers le bas jusqu'à la ligne 16. si il n'y a pas eu d'erreur, on doit retrouver exactement les coordonnées du point d'arrivée C en ligne 16.

– **Tolérance de fermeture planimétrique**

Li^2 , en case O10 : = (M10–M\$16)^2+(N10–N\$16)^2 , recopiez vers le bas jusqu'à O16 .

Somme des Li^2 , entrez en case O18 : = SOMME(O10:O16).

Entrez en case N20 : = RACINE(16+16*6+160*O18).

Entrez en case N21 : = RACINE(400+160*E19+260*O18).

Pour terminer, réglez les chiffres après la virgule au moyen de l'option NOMBRE du menu local FORMAT DE CELLULE (accessible en cliquant sur une sélection avec le bouton droit de la souris). Pour sélectionner en même temps des zones non contiguës, maintenez le bouton CONTROL enfoncé pendant la sélection.

Remarque

Une présentation plus rigoureuse devrait aligner les distances mesurées avec les gisements et intercaler les angles lus (une ligne sur deux). Cela ne facilite pas la recopie des formules : c'est pourquoi le tableau que nous venons de faire ne suit pas ce principe (voir le tableau de polygonation du paragraphe 1.5.2. pour illustrer ce type de présentation).

◆ **Construction graphique au moyen d'AutoCAD LT**



La compensation en X et Y d'une polygonale peut être faite graphiquement, cela ne donnera pas exactement le même résultat qu'une compensation analytique mais en restera très proche. Il faut dans un premier temps calculer les gisements des côtés, l'erreur de fermeture angulaire et la compenser de manière à obtenir les gisements définitifs.

Environnement de travail : angles en grades avec quatre chiffres significatifs, longueurs en unités décimales avec deux chiffres significatifs, zéro des angles au nord et sens de rotation horaire.

– **Dessin des points d'appui** (en négligeant les dizaines de milliers de km)

POINT ↵ 1030.06,6888.22 ↵ ↵ 3156,4326 ↵ ↵ 5380.62,6009.89 ↵ ↵ 4652.96,8079.17 ↵

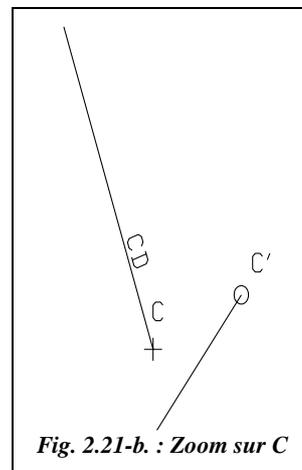
LIGNE ↵ du point A (NODal de...) vers B et LIGNE ↵ de C vers D.

On peut contrôler avec la commande LISTE ↵ appliquée aux droites AB et CD les valeurs calculées des gisements G_{AB} , G_{CD} et des distance D_{AB} et D_{CD} .

- **Dessin du cheminement** : on peut, dans un premier temps, dessiner le cheminement à partir des données brutes de terrain (D_r et $H_g = L_v - L_r$) : cela permet de contrôler l'erreur de fermeture angulaire (voir au paragraphe 2.3.3. comment « automatiser » la procédure d'entrée du cheminement). On dessine ensuite le cheminement après compensation angulaire :

LIGNE du point B (NODal de...) au point @653.113<17.4887 au point @453.524<76.9776 au point @460.558<35.3126 au point @602.247<82.0285 au point @522.817<102.2692 au point @451.441<42.5711

Vous devez obtenir la polygonale de la figure 2.21-a..



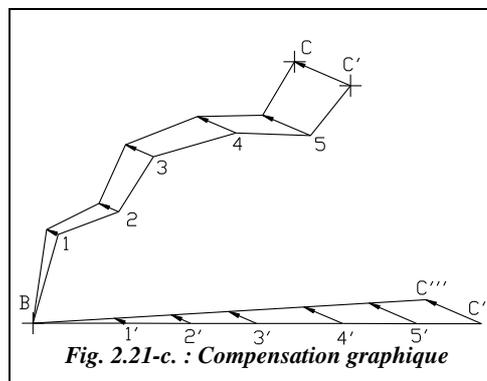
- **Contrôle des écarts de fermeture**

En zoom très près du point C, vous devez obtenir l'équivalent de la figure 2.21-b.

On peut contrôler que l'on retrouve les écarts de fermeture en X et en Y en mesurant la distance CC' : *DISTANCE* de NODal de.. à EXTrémité de.. (80 mm en X , 39 mm en Y).

- **Compensation des fermetures planimétriques**

Sur la figure 2.21-c l'erreur de fermeture est considérablement exagérée pour la compréhension du raisonnement. Le cheminement B-1-2-3-4-5-C' est développé sur la droite B-C''. On obtient ainsi les points 1', 2', ..., 5', C''. Le vecteur de fermeture C'C est reporté en C''-C'''.



On en déduit une répartition **parallèle proportionnelle** de la fermeture : on trace la droite B-C''' puis on reporte des parallèles au vecteur de fermeture par chaque point 1', 2', ..., 5'. La longueur de vecteur ajustée à la droite B-C''' est la part de compensation de chaque point. Il reste à reporter chaque vecteur ajusté aux sommets 1, 2, ..., 5.

Remarquez que les gisements des côtés seront légèrement modifiés après cette transformation...

- **Sur le cheminement réel**

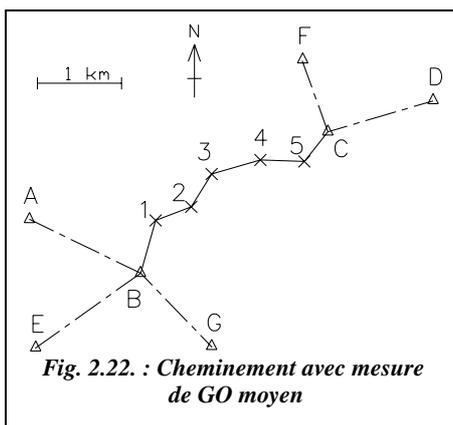
LIGNE du point B au point @653.113<100 au point @453.524<100 au point ... au point @451.441<100

En zoom très près de C, dessinez le vecteur de fermeture C-C' : LIGNE de NODal de.. à EXTrémité de..

COPIER ce vecteur depuis C' jusqu'en C'' (utilisez la commande 'z : apostrophe suivi de z qui rend la commande ZOOM transparente c'est-à-dire pouvant être utilisée pendant une autre commande, ici pendant la commande COPIER). Tracez la droite B-C''' : LIGNE de NODal de.. à EXTrémité de.. puis copier le vecteur C''-C''' de C'' vers chaque point 1', 2', ..., 5'. AJUSTER ensuite (en zoom) tous ces vecteurs à la droite B-C'''. COPIER enfin chacun d'eux vers les sommets 1, 2, ..., 5.

Résultats : il reste à lire les coordonnées des points après « compensation graphique ». Commande ID de EXTrémité de... (en zoom). On obtient au centimètre près les mêmes coordonnées que par le calcul numérique du tableau précédent. La rentabilité de cette méthode n'est pas évidente, mais elle constitue un excellent exercice de manipulation des objets AutoCAD et la concrétisation visuelle d'une compensation.

1.5.2 Cheminement avec mesure de GO de station



Afin d'améliorer la précision de l'orientation de départ d'une polygonale en canevas de précision, il est intéressant de calculer un *Gomoyen* de station au départ et à l'arrivée.

Par exemple, sur le parcours schématisé ci-contre (fig. 2.22.), un *Gomoyen* de station a été calculé au départ (au point B sur trois points d'appui) et à l'arrivée (au point C sur deux points d'appui). On travaille en canevas de précision. En reprenant les données de l'exemple précédent, calculez à nouveau les coordonnées des sommets 1, 2, 3, 4 et 5.

Attention : les coordonnées des points A et D ont changées, de même que les lectures *Lv* du point B vers le point 1 et *Lr* du point C vers 5 (voir les tableaux de données ci-dessous).

Points d'appui :

	E (m)	N (m)
A	981 831,06	154 968,69
B	983 156,00	154 326,00
C	985 380,62	156 009,89
D	986 631,00	156 378,27
E	981 903,01	153 431,50
F	985 075,81	156 856,89
G	984 006,01	153 442,56

Tours d'horizon en B et en C :

Stat B	Hz	Stat C	Hz
Pts visés	(gon)	Pts visés	(gon)
G	72,7543	F	40,2338
E	182,0577	D	143,9861
A	250,2808	5	304,7976
1	339,0179		

G0moyen de station en B

Canevas de précision :

$Emq = 1,1$ mgon

Tolérance 1,2 mgon

$Rmq = 2,5$ cm

Tolérance 2,5 cm

Stat B Pts visés	H _z (gon)	G _{B-Pi} (gon)	G0 _i (gon)	Dr _i (km)	e _i (mgon)	r _i (cm)
G	72,7543	151,2276	78,4733	1,2	-1,0	2,0
E	182,0577	260,5303	78,4726	1,5	-0,3	0,8
A	250,2808	328,7519	78,4711	1,5	1,2	2,8
		G0moyen :	78,4723	Tol :	1,5	4,0

G0moyen de station en C

Canevas de précision :

$Emq = 0,4$ mgon

Tolérance 1,3 mgon

$Rmq = 0,7$ cm

Tolérance 2,5 cm

Stat C Pts visés	H _z (gon)	G _{C-Pi} (gon)	G0 _i (gon)	Dr _i (km)	e _i (mgon)	r _i (cm)
F	40,2338	378,0086	337,7748	0,9	0,3	0,5
D	143,9861	81,7603	337,7742	1,3	-0,2	0,5
		G0moyen	337,7744	Tol :	1,7	4,0

Tableau des calculs de polygonation

St	Hg gon	Gisement brut	Poids km ⁻¹	Ca dmg	Gisement compensé	Delta E m	C _E mm	Delta N m	C _N mm	Coordonnées en m	
										E	N
		278,4723			278,4723						
B	339,0179	17,4902	1,5	5	17,4907	177,189	-23	628,618	-3	983 156,00	154 326,00
1	259,4873	76,9775	3,7	12	76,9791	424,194	-16	160,448	-2	983 333,17	154 954,62
2	158,3331	35,3106	4,4	14	35,3136	242,572	-16	391,500	-2	983 757,34	155 115,06
3	246,7143	82,0249	3,8	12	82,0291	578,411	-21	167,757	-2	983 999,90	155 506,56
4	220,2392	102,2641	3,6	11	102,2694	522,485	-18	-18,633	-2	984 578,29	155 674,31
5	140,3002	42,5643	4,1	13	42,5709	279,879	-16	354,213	-2	985 100,76	155 655,68
C	-304,7972	337,7671	2,2	7	337,7744					985 380,62	156 009,89
Σ			23,4	73		2224,730	-110	1683,903	-13		
L	3143,700		f _a =	-7,3	mgon		f _E	11,0	cm	Tolérances	cm
	Tolérance	précision		16,3	mgon		f _N	1,3	cm	précision	57,1
		ordinaire		32,1	mgon		f _p	11,1	cm	ordinaire	77,5

Commentaires du tableau des calculs de polygonation

Le gisement de départ est $GO_B - 200$; le gisement d'arrivée est GO_C .

Hg_B est égal à Lv_B ; Hg_C est négatif : $Hg_C = -Lr_C$.

La fermeture angulaire est calculée à partir du GO observé d'arrivée :

$$fa = GO_{C\text{obs}} - GO_C = 337,7671 - 337,7744 = -0,0073\text{gon}$$

Les visées du point B sur le GO de départ et du point C sur le GO d'arrivée sont considérées de longueurs infinies et n'entrent donc pas en compte dans le calcul des poids.

La compensation est réalisée directement sur les gisements bruts avec cumul à chaque ligne des compensations précédentes. Lorsque la compensation se fait sur les angles H_z , ce cumul est automatique dans le calcul.

La colonne Li^2 n'est pas reproduite puisqu'elle est identique à celle du tableau de l'exemple précédent.

1.6 Calcul en retour

Ce calcul est une dernière étape intervenant après que le cheminement ait été complètement calculé, c'est-à-dire après avoir effectué les ajustements angulaires et planimétriques : on dit que le cheminement est rendu **réversible** angulairement et planimétriquement puisque le résultat est identique quel que soit le sens de parcours choisi.

Le « calcul en retour » est donc un nouveau calcul des gisements et des distances entre sommets après ajustements angulaires et planimétriques. On recalcule gisements et distances à partir des coordonnées définitives arrondies au même nombre de décimales que les points d'appui. Ce calcul fournit les gisements et distances correspondant exactement aux coordonnées déterminées pour les sommets du cheminement. On peut contrôler les écarts entre distances et gisements mesurés et leurs valeurs issues du calcul en retour. C'est sur ces derniers résultats que l'on s'appuie pour d'éventuels calculs ultérieurs (cheminements secondaires, stations alignées, antennes, etc.). Par exemple, à partir des résultats du dernier calcul, on obtiendrait le calcul en retour détaillé dans le tableau suivant :

Point	E (m)	N (m)	Gisement (gon)	ε (mgon)	Distance Dr (m)	Δ (mm)
B	983 156,00	154 326,00				
1	983 333,17	154 954,62	17,4888	2	653,110	3
2	983 757,34	155 115,06	76,9791	0	453,499	25
3	983 999,90	155 506,56	35,3122	1	460,551	7
4	984 578,29	155 674,31	82,0292	0	602,225	22
5	985 100,76	155 655,68	102,2691	0	522,802	15
			42,5690	2	451,427	14
C	985 380,62	156 009,89				

ε est l'écart entre le gisement compensé du tableau précédent et le gisement définitif.

Δ est l'écart entre la distance observée du tableau précédent et la distance définitive.

1.7 Cheminements particuliers

1.7.1 Cheminement fermé en lever local

Dans le cadre d'un lever local (propriété, lever de détail non rattaché, etc.), on peut effectuer un cheminement fermé en se fixant des coordonnées fictives de départ qui seront choisies entières et de manière à éviter des coordonnées négatives (par exemple, $X_d = 100,00$; $Y_d = 100,00$).

Si l'on désire orienter le cheminement par rapport au nord géographique, on peut mesurer le gisement approximatif du premier côté avec une **boussole** (ou le lire sur l'éventuel **déclinatoire** de l'appareil), et prendre cette valeur comme gisement de départ. Si l'orientation n'est pas nécessaire, on se fixe un gisement fictif de départ, par exemple 100 gon, et on ne compense le premier côté qu'en X de manière à conserver ce gisement.

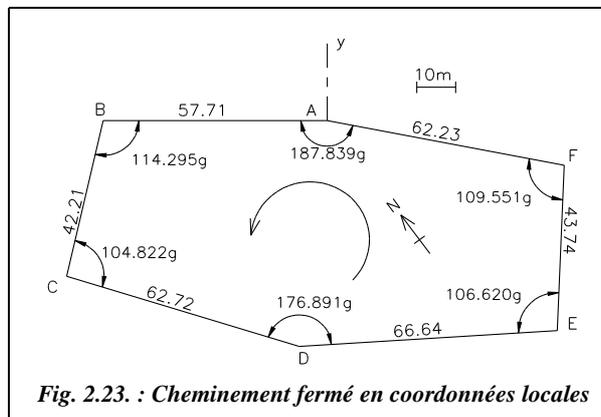


Fig. 2.23. : Cheminement fermé en coordonnées locales

Application

Calculez par exemple le cheminement fermé représenté sur la figure 2.23. Les données du lever sont indiquées sur le schéma.

Sur le terrain, on vérifie que $\Sigma Hg = 800,018$ gon. Cette valeur est à comparer avec la valeur théorique $(n - 2) \cdot 200 = 800$. On trouve un écart de 18 mgon.

On se fixe des coordonnées fictives pour A (1 000,00 m ; 1 000,00 m) et un gisement de départ fictif $G_{AB} = 300$ gon. Les angles lus sont les angles de gauche dans le sens du parcours.

Étant donnée la relative homogénéité des côtés, les fermetures angulaires sont réparties également sur chaque sommet. Pour la compensation en ordonnées (C_Y), le premier côté n'est pas modifié de manière à conserver le gisement fictif de départ égal à 300 gon.

Les tolérances sont calculées en canevas polygonal ordinaire en négligeant le terme $30.L$ (erreurs systématiques). Pour des côtés de petite longueur, on peut négliger le terme (ΣLi^2) dans le calcul de la tolérance de fermeture planimétrique. Si l'on n'en tient pas compte, on trouve $T = 7,3$ cm (en canevas ordinaire).

De même, les côtés étant petits, on peut confondre les distances Dh et Dr .

Le tableau suivant résume le calcul de la polygonale de la figure 2.23.

Pts Pi	Dr m	Hg gon	Ca mg	Gij gon	Delta E m	Delta N m	C _E mm	C _N mm	Est m	Nord m	L ² km ²
A									1000,00	1000,00	0,000
B	57,71			300,000	-57,71	0,00	-3	0			
		114,295	-3						942,29	1000,00	0,004
C	42,21			214,292	-9,40	-41,15	-2	-1			
		104,822	-3						932,89	958,85	0,006
D	62,72			119,111	59,92	-18,55	-3	-2			
		176,891	-3						992,80	940,30	0,004
E	66,64			95,999	66,51	4,19	-3	-3			
		106,620	-3						1059,31	944,48	0,006
F	43,74			2,616	1,80	43,70	-2	-1			
		109,551	-3						1061,10	988,18	0,004
A	62,23			312,164	-61,10	11,82	-3	-2			
		187,839	-3						1000,00	1000,00	0,000
L				300,000							
L	335,25	800,018	-18		0,016	0,009	-16	-9			ΣLi^2 0,024
n	6				f_E	1,6	cm				
		$fa =$	18	mgon	f_N	0,9	cm				
		Tolérance	24	mgon	f_p	1,9	cm		Tolérance	7,7	cm

1.7.2 Cheminement non orienté au départ ni à l'arrivée

Si l'on désire effectuer un cheminement rattaché au système Lambert entre deux points connus A et B et si aucun point d'appui n'est visible depuis les stations A et B, on ne peut orienter le cheminement. Il n'y a donc aucun contrôle direct des lectures angulaires ; c'est pourquoi il est préférable d'éviter ce type de manipulation.

Toutefois, on peut calculer ce cheminement et le rattacher au système Lambert en calculant le cheminement AB dans un repère local fictif puis en faisant subir à l'ensemble des sommets calculés une rotation pour les ramener en système de coordonnées général.

Exemple

Calculez et rattachez le cheminement de la figure 2.24. en canevas polygonal de précision. Les coordonnées des points A et B sont données dans le tableau ci-contre.

Points	E (m)	N (m)
A	988 666,73	151 929,10
B	990 244,13	153 039,50

On calcule le gisement de départ $G_{AB} = 60,952$ gon.

On effectue un premier calcul fictif d'un cheminement A, 1', 2', 3', B' en fixant un gisement fictif pour le premier côté : $G_{A1'} = 100$ gon.

Ce premier calcul donne les coordonnées fictives B' du point B. On en déduit le gisement $G_{AB'} = 121,124$ gon.

La rotation à faire subir à l'ensemble du cheminement pour recalculer la direction fictive AB' sur la direction réelle AB est : $121,1244 - 60,9518 = 60,1726$ gon.

On soustrait ensuite cette valeur à chaque gisement fictif pour obtenir le gisement définitif (sans contrôle !).

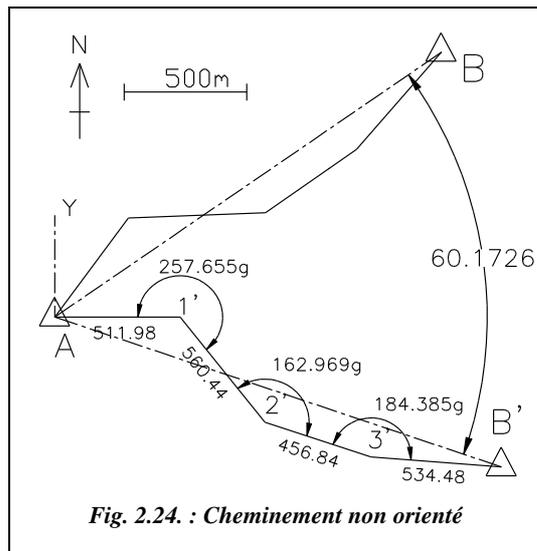


Fig. 2.24. : Cheminement non orienté

Le tableau ci-après résume le calcul des coordonnées fictives.

Points Pi	Distances Dr m	Angles Hg gon	Gisement Gij gon	Delta E ΔE m	Delta N ΔN m	E m	N m
A						988 666,73	151 929,10
1'	511,98		100,000	511,98	0,00		
2'	560,44	257,655	157,655	345,89	-440,97	989 178,71	151 929,10
3'	456,84	162,969	120,624	433,08	-145,42	989 524,60	151 488,13
B'	534,48	184,385	105,009	532,83	-42,01	989 957,68	151 342,71
B'						990 490,50	151 300,70

Le tableau suivant résume le calcul des coordonnées définitives. Ce calcul ne permet qu'un contrôle de la fermeture planimétrique. Notons qu'elle englobe la fermeture angulaire puisque l'écart de fermeture planimétrique final est aussi dû aux erreurs de lectures angulaires.

Pts Pi	Dr m	Hg gon	Gisem. gon	Delta E m	Delta N m	C _E mm	C _N mm	E m	N m	Li ² km ²
A								988 666,73	151 929,10	3,72
1	511,98		39,827	299,81	415,01	7	5			
2	560,44	257,655	97,482	560,00	22,16	8	5	988 966,55	152 344,12	2,10
3	456,84	162,969	60,451	371,49	265,90	7	4	989 526,56	152 366,28	0,96
B	534,48	184,385	44,836	346,07	407,31	8	5	989 898,05	152 632,18	0,28
B								990 244,13	153 039,50	0,00
Σ	2063,74			1577,37	1110,38	30	19			$\Sigma Li^2 = 7,06$
				$f_E =$	-3,0 cm			$f_p =$	3,6 cm	
				$f_N =$	-1,9 cm			Tolérance	35 cm	

◆ Résolution graphique au moyen d'AutoCAD LT



L'environnement de travail est préalablement défini comme suit dans le menu **FORMAT / CONTROLE DES UNITES** : angles en grades à quatre chiffres après la virgule, direction du zéro au nord (100 gon) et sens de rotation horaire, longueurs décimales à trois chiffres. Dans le menu **FORMAT / STYLE DES POINTS**, choisissez la croix et réglez sa taille en unités absolues à 50 m.

– Dessin des points A et B

POINT ↵ 988666.73,151929.1 ↵ puis *POINT* ↵ 990244.13,153039.5 ↵

Zoom ↵ *Etendu* ↵ suivi de *Zoom* ↵ 0.8X ↵

– Dessin du cheminement

LIGNE ↵ du point *NODal* de... (point A) au point @511.98<100 ↵ au point @560.44<157.655 ↵

SCU ↵ option *OBjet* ↵, cliquez sur le dernier côté tracé vers son origine (l'axe X du repère est placé sur ce côté, l'azimut du prochain côté sera alors dans ce repère l'angle au sommet diminué de 100 gon). Si vous cliquez vers l'autre extrémité du côté précédent, l'azimut sera égal à l'angle au sommet augmenté de 100 gon.

Plus simplement, on peut faire : *SCU* ↵ option *OBjet* ↵ option de choix *Dernier* ↵ (dernier objet dessiné) ; le SCU se positionne alors directement sur le dernier objet dessiné (ici sur le côté précédent, origine au départ du côté).

LIGNE ↵ du point *EXTrémité* du côté précédent au point @456.84<62.969 ↵

SCU ↵ option *OBjet* ↵, choix de l'objet : *Dernier* ↵

LIGNE ↵ du point *EXTrémité* du côté précédent au point @534.48<84.385 ↵

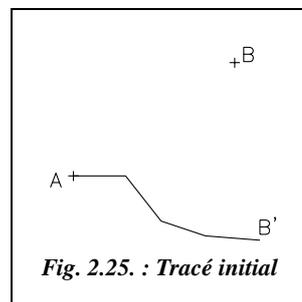
SCU ↵ ↵ pour retourner au SCU général.

Vous devez obtenir l'équivalent de la figure 2.25.

– Alignement de AB' sur AB

ROTATION ↵ des quatre côtés précédents autour du point A (*NODal* de...), option *Référence* ↵ : donnez la référence par *NODal* de... (point A) puis *EXTrémité* du dernier côté (point B') ; donnez ensuite le nouvel angle par *NODal* de... (point B).

On peut mesurer la fermeture planimétrique par *DIS-TANCE* ↵ de *EXTrémité* de... (point B' après rotation) à *NODal* de... (point B) : on lit une distance de 0.036 m.



– Modification d'échelle pour adapter la longueur AB' à la longueur AB

ECHELLE ↵ des 4 côtés précédents par rapport au point A (*NODal* de...), option *Référence* ↵ : donnez la longueur de référence par *NODal* de... (point A) et *EXTrémité* du dernier côté (point B' après rotation), donnez la nouvelle longueur par *NODal* de.. point B.

– Lecture des résultats

ID ↵ *INTersection* de... donne seulement les coordonnées des sommets. *LISTE* ↵ donne toutes les caractéristiques de tous les côtés (point de départ, point d'arrivée, longueur, gisement appelé angle dans le plan XY). On retrouve les résultats précédents, bien que la compensation planimétrique soit faite ici par une autre méthode que dans le calcul manuel ; pour des fermetures plus importantes, les résultats peuvent être différents.

1.7.3 Stations intermédiaires alignées

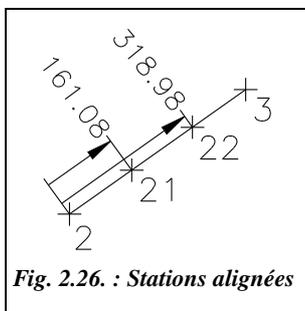


Fig. 2.26. : Stations alignées

Lorsqu'il est nécessaire d'ajouter des stations intermédiaires, elles sont alignées au théodolite en commençant par la plus éloignée et en même temps que s'effectue la polygonalement : ceci permet d'obtenir le nombre de stations nécessaires en conservant de longs côtés.

Sur la figure 2.26., les points 21 et 22 sont alignés sur le côté 2-3 du cheminement calculé au paragraphe 1.7.2.

On calcule d'abord le cheminement sans tenir compte des stations alignées (voir § 1.7.2.). Le calcul en retour détaillé dans le tableau suivant fournit le gisement définitif et la distance définitive du côté sur lequel les stations sont alignées.

Pts	E	N	Gisem.	ε	Distance	Δ
Pi	(m)	(m)	(gon)	(mgon)	Dr (m)	(mm)
A	988 666,73	151 929,10				
			39,828	0,6	511,99	9,9
1	988 966,55	152 344,12				
			97,482	-0,3	560,45	8,3
2	989 526,56	152 366,28				
			60,451	-0,1	456,85	5,3
3	989 898,05	152 632,18				
			44,837	0,2	534,49	11,3
B	990 244,13	153 039,50				

Pour tenir compte du fait que les distances observées ont été modifiées par l'ajustement planimétrique (et angulaire), on utilise un coefficient modificateur d'échelle m calculé avec six décimales :

$$m = \frac{\text{Distance (2-3) définitive}}{\text{Distance (2-3) observée}} \quad (\text{ici } m = 1,000\,012)$$

Pts	Gisem.	Dr obs.	Dr déf. (m)	E	N
Pi	(gon)	(m)	x 1,000 012	(m)	(m)
2				989 526,56	152 366,28
	60,451	161,080	161,082		
21				989 657,55	152 460,04
2				989 526,56	152 366,28
	60,451	318,980	318,984		
22				989 785,95	152 551,94

Les distances observées du sommet 2 aux nouveaux sommets 21 et 22 sont multipliées par le coefficient m pour obtenir les distances définitives qui serviront au calcul de leurs coordonnées.

Le tableau précédent donne les coordonnées des points 21 et 22.

◆ Résolution graphique



Traitez cet exemple à la suite du précédent et dans le même dessin.

Zoom ↵ autour du côté 2-3

– Dessin des points 21, 22 et de la longueur observée du côté 2-3

SCU ↵ option *Objet* ↵, cliquez sur le côté 2-3 vers le point 2.

POINT ↵ 161.08,0 ↵ puis POINT ↵ 318.98,0 ↵

– Mise à l'échelle des distances 2-21 et 2-22

ECHELLE ↵ sélectionnez les points 21 et 22 par une fenêtre, option *Référence* ↵, la longueur de référence est 456.84 ↵, la nouvelle longueur va jusqu'à *INTersection* de... (point 3).

Retour au SCU général par SCU ↵ ↵

Lisez les coordonnées des points 21 et 22 avec ID ↵ *NODal* de...

1.8 Fautes en cheminement

Les cheminements fermés ont l'avantage de donner un résultat en fermeture planimétrique qui ne dépend que de la manipulation effectuée. En effet, un cheminement encadré est tributaire de la précision planimétrique des points d'appui. En revanche, dans le cas d'un cheminement fermé, il est impossible de se rendre compte, d'après les calculs, de la présence des deux types de fautes suivants.

- **Erreur d'étalonnage des appareils de mesure des distances** : dans un cheminement encadré, cette faute apparaît dans la fermeture planimétrique et est résorbée par la compensation finale. Dans un cheminement fermé, au contraire, elle n'apparaît pas puisqu'on obtient un polygone homothétique du polygone réel (fig. 2.27.) et qui reste dans les tolérances angulaires et planimétriques. Il faut étalonner l'appareil de mesure ou effectuer un cheminement encadré de contrôle entre deux points du cheminement fermé.

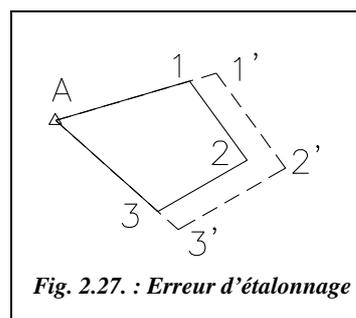


Fig. 2.27. : Erreur d'étalonnage

- **Faute sur l'orientation de départ d'un cheminement fermé :** faute de calcul du gisement de départ ou faute en lecture d'angle. Ces fautes ne peuvent être décelées car le polygone calculé se déduit du polygone réel par une rotation d'ensemble de l'angle correspondant à la faute commise (fig. 2.28.). Le retour au point de départ ne permet pas de se rendre compte d'une faute de calcul du gisement de départ.

On contourne cet inconvénient en faisant une nouvelle orientation à l'arrivée sur un point différent de celui ayant servi à l'orientation de départ.

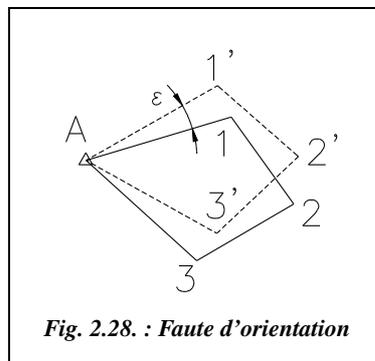


Fig. 2.28. : Faute d'orientation

En conclusion, la meilleure manipulation est un cheminement encadré suivi d'un retour au point de départ (le cheminement global est fermé, mais il est constitué de deux cheminements encadrés). L'intérêt est de combiner l'avantage de l'indépendance des points d'appui du cheminement fermé avec la sûreté du cheminement encadré.

2 POINT NODAL EN PLANIMÉTRIE

2.1 Définition

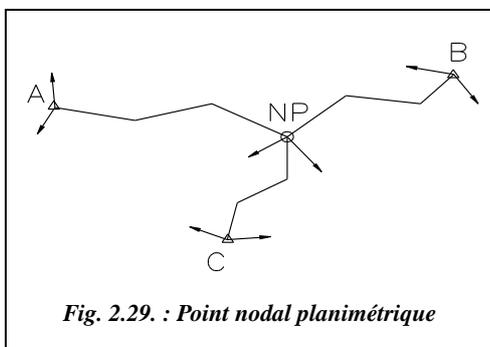


Fig. 2.29. : Point nodal planimétrique

C'est la rencontre d'au moins trois demi-cheminements (ou antennes) issus chacun d'un point connu en coordonnées et d'où, éventuellement, une ou plusieurs directions sont observées sur des points anciens pour le calcul du *G0moyen* de station (voir la représentation correspondante sur la figure 2.29).

NP représente les points nodaux principaux (nœuds de cheminements principaux).

NS représente les points nodaux secondaires (nœuds de cheminements secondaires).

Nous noterons par la suite P le point nodal pour éviter la confusion avec les ordonnées *N*.

2.2 Méthode de calcul

Le principe est de calculer chaque « antenne » arrivant au point nodal comme un cheminement encadré entre le point d'appui de départ et le point nodal. Ce dernier est ainsi déterminé au moins trois fois et, par moyenne pondérée, on obtient ses coordonnées définitives. Les antennes deviennent alors des cheminements encadrés.

En station sur le point nodal, un tour d'horizon est effectué, incluant tous les derniers points des cheminements aboutissant au point nodal, avec, si possible, des visées supplémentaires sur quelques points lointains.

2.2.1 Fermeture angulaire et tolérance

La fermeture angulaire de chaque cheminement est réalisée sur la direction ayant servi de référence au tour d'horizon effectué en station sur le point nodal. On obtient autant de gisements d'arrivée observés (ou de $G0$ d'arrivée) qu'il y a de demi-cheminements. On en fait la moyenne pondérée pour obtenir le gisement (ou le $G0$) d'arrivée.

$G_p = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} G_{Pj} \cdot p_j}{\sum_{j=1}^{j=n} p_j} \quad \text{ou bien} \quad G0_p = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} G0_j \cdot p_j}{\sum_{j=1}^{j=n} p_j}$	<p>G_p est le gisement d'arrivée en P. $G0_p$ est le $G0$ d'arrivée en P. n est le nombre de cheminements. p_j est le poids du cheminement n° j.</p> $p_j = \frac{K}{Ta_j^2}$
---	---

- Dans cette expression de p_j :
 K est une constante arbitraire ; on prend généralement $K = 1\ 000$ ce qui permet de limiter le nombre de chiffres après la virgule à écrire pour p_j , qui est alors calculé avec quatre décimales si le calcul est fait avec une calculatrice.
- Ta , exprimée en mgon, est la tolérance de fermeture angulaire de chaque cheminement considéré encadré entre le point de départ et le point nodal (voir § 1.3.6.2.). Logiquement, plus cette tolérance est grande et moins on donne de poids à un demi-cheminement arrivant au point nodal.

Après avoir calculé le gisement d'arrivée moyen pondéré G_p (ou bien le $G0$ en P), on détermine les n écarts à la moyenne entre chaque gisement d'arrivée et le gisement d'arrivée moyen pondéré. Ces écarts f_{aj} sont la fermeture angulaire de chaque cheminement :

$f_{aj} = G_{Pj} - G_p$	ou encore : $f_{aj} = G0_{Pj} - G0_p$.
-------------------------	---

Ces fermetures doivent être comparées à la tolérance de fermeture angulaire de chaque demi-cheminement qui est :

$$Tam_j = \sqrt{Ta_j^2 - \frac{K}{\sum_{j=1}^{j=n} p_j}}$$

Tam_j , en mgon, est la tolérance de fermeture angulaire moyenne de chaque demi-cheminement aboutissant au point nodal P ;
 Ta_j , en mgon, est la tolérance de fermeture angulaire du cheminement encadré entre son point de départ et le point nodal.

2.2.2 Fermeture planimétrique et tolérance

À présent, on calcule les coordonnées du point nodal à partir de chaque cheminement compensé angulairement (on dit aussi « rendu réversible angulairement »). On obtient donc autant de coordonnées d'arrivée E_{Pj} , N_{Pj} qu'il y a de demi-cheminements aboutissant au point nodal P. Les coordonnées du point P sont déterminées par moyenne pondérée :

$$E_P = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} p_j \cdot E_{Pj}}{\sum_{j=1}^{j=n} p_j} \text{ et } N_P = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} p_j \cdot N_{Pj}}{\sum_{j=1}^{j=n} p_j \cdot E_{Pj}}$$

n est le nombre de cheminements aboutissant au point nodal N.

$p_j = \frac{K}{Tp_j^2}$ est le poids de chaque cheminement.

K est une constante arbitraire (on prend généralement $K = 1\ 000$).

T_p , exprimée en centimètre, est la tolérance de fermeture planimétrique de chaque cheminement considéré encadré entre le point de départ et le point nodal (voir § 1.4.2.4.). Logiquement, plus cette tolérance est grande et moins on donne de poids à un cheminement dans la détermination de E_P et N_P .

Après avoir calculé les coordonnées moyennes pondérées (E_P ; N_P), on détermine les $2.n$ écarts à la moyenne f_{Ej} et f_{Nj} entre chaque coordonnée d'arrivée observée et les coordonnées moyennes pondérées. Ces écarts sont les fermetures en Est et en Nord de chaque demi-cheminement :

$$f_{Ej} = E_{Pj} - E_P, f_{Nj} = N_{Pj} - N_P$$

La **fermeture planimétrique** de chaque demi-cheminement est donc :

$$fpj = \sqrt{f_{Ej}^2 + f_{Nj}^2}$$

On compare ensuite chaque fermeture à la tolérance correspondante :

$T_{pm_j} = \sqrt{T_{p_j}^2 - \frac{K}{\sum_{j=1}^n p_j}}$	<p>T_{pm_j} en centimètre, est la tolérance de fermeture planimétrique moyenne d'un demi-cheminement aboutissant au point nodal P.</p> <p>T_{p_j} en centimètre, est la tolérance du cheminement encadré entre son point de départ et le point nodal P.</p>
--	---

Le procédé de calcul est aussi donné dans l'arrêté de janvier 1980 au paragraphe 3.2.3.

2.2.3 Calcul final

Le point nodal étant déterminé par ses coordonnées, on calcule chaque demi-cheminement aboutissant au point nodal comme un cheminement encadré entre point de départ et point nodal, de manière à harmoniser les coordonnées des sommets avec les coordonnées définitives du point nodal.

2.2.4 Ellipses de tolérance

On peut utiliser les ellipses de tolérance traitées au paragraphe 1.4.2.1. pour construire graphiquement le point P.

Sur un graphique à grande échelle (1/5, 1/10...), on reporte chaque point d'arrivée observé : on choisit, par exemple, comme origine du repère de la construction graphique le point d'arrivée observé du premier cheminement. Ensuite, on reporte les autres par leurs différences de coordonnées. Enfin, on reporte les directions générales des demi-cheminements et les ellipses de tolérance de chaque demi-cheminement (fig. 2.30.).

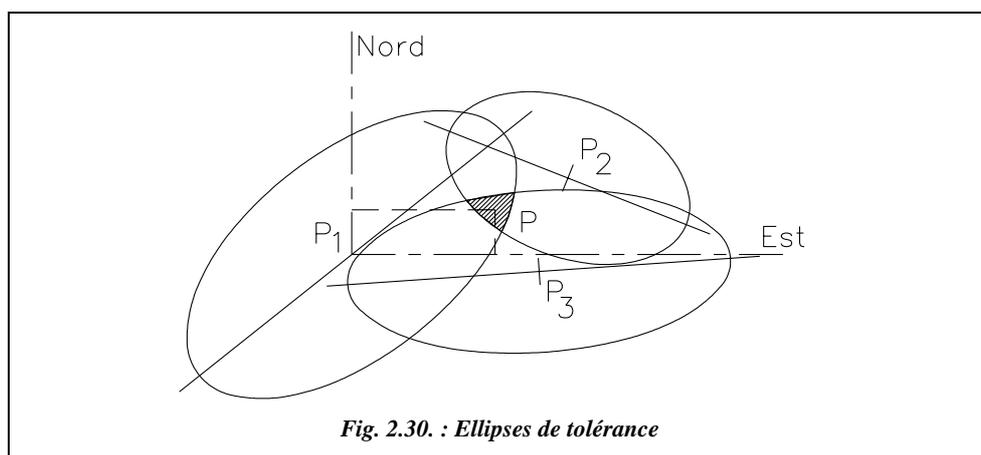
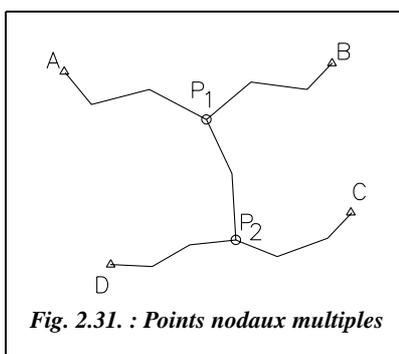


Fig. 2.30. : Ellipses de tolérance

Si ces ellipses n'ont pas de zone commune, la manipulation est hors tolérance.

Si ces ellipses ont une zone commune, on place le point P à vue et on lit ses coordonnées par rapport au point choisi comme centre du repère.

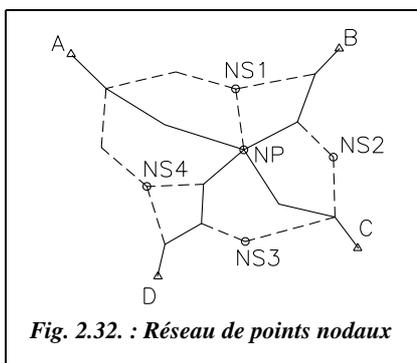
2.2.5 Points nodaux multiples



Dans le cas de points nodaux multiples (fig. 2.31.), on calcule les cheminements, par exemple, dans l'ordre suivant :

Cheminements	Point calculé
A → P ₁	P ₁
B → P ₁	
C → P ₁	
D → P ₁	
A → P ₂	P ₂
B → P ₂	
C → P ₂	
D → P ₂	

On calcule finalement chaque demi-cheminement comme un cheminement encadré entre les points d'appui A, B, C et D et les points nodaux P₁ et P₂.



Si le nombre de points nodaux est plus important (fig. 2.32.), on calcule d'abord le point nodal le plus central qui devient un point nodal principal (NP) et ensuite les points nodaux périphériques qui deviennent des points nodaux secondaires (NS).

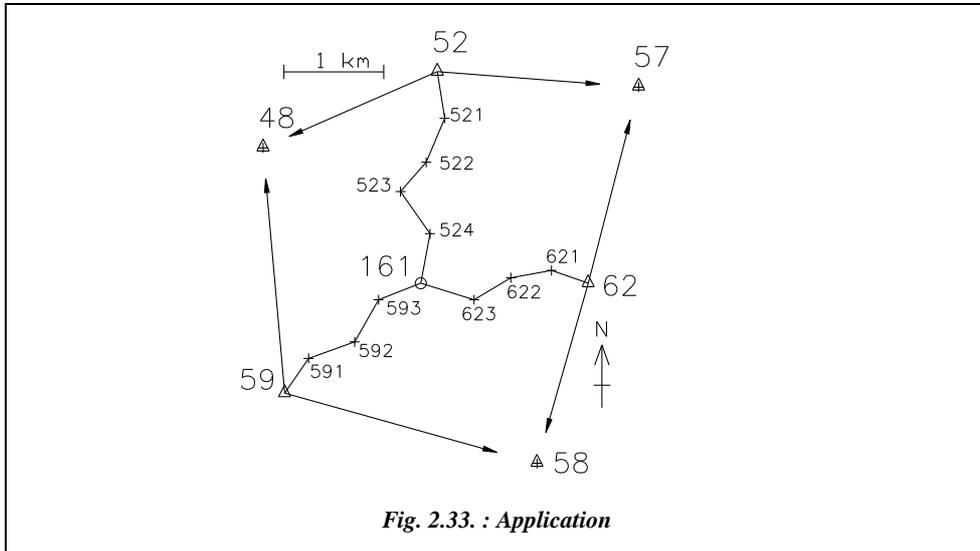
Dans le cadre de petits travaux, le poids p_j d'un cheminement de n côtés peut être simplifié comme suit :

$$p_j = \frac{1}{n}$$

2.3 Exemple de calcul de point nodal

2.3.1 Calcul numérique

On cherche à calculer les coordonnées du point 161 du canevas d'ensemble ordinaire auquel aboutissent trois demi-cheminements partant des points 52, 62 et 59 connus en coordonnées et sur lesquels un *G0moyen* de station a été calculé (voir fig. 2.33.). Le point 593 est choisi comme référence du tour d'horizon effectué au point nodal 161.



Les coordonnées des points d'appui sont données dans le tableau suivant :

Points	E (m)	N (m)
48	982 525,78	175 152,49
52	984 274,11	175 919,31
57	986 294,80	175 763,86
58	985 274,72	171 977,45
59	982 743,18	172 683,97
62	985 788,83	173 790,53

Le tableau suivant détaille les tours d'horizon effectués en station sur les points de départ des cheminements et sur le point nodal.

Station	52	Station	62	Station	59	Station	161
Points	Lect. (gon)						
57	7,8170	57	17,7948	48	13,2461	593	125,4967
521	92,8409	58	219,4023	591	57,0602	524	260,8902
48	176,6185	621	323,2331	58	136,1641	623	368,3620

◆ **Calculs des *G0moyen* de station au départ des cheminements**

Le tableau suivant détaille les calculs de *G0moyen* de station aux points 52, 62 et 59.

Station 52	Lectures (gon)	Distance (km)	Gisement (gon)	G0i (gon)	ei (mgon)	ri (cm)
Pt 57	7,817	2,03	104,8878	97,0708	1,5	4,7
Pt 48	176,6185	1,91	273,6863	97,0678	-1,6	-4,7
		1,97	G0m =	97,0694	Tol 4,6 mgon	Tol : 20 cm
Station 62						
57	17,7948	2,04	15,9790	398,1842	-1,7	-5,5
58	219,4023	1,88	217,5900	398,1877	1,8	5,5
		1,96	G0m =	398,1859	Tol 4,6 mgon	Tol : 20 cm
Station 59						
48	13,2461	2,48	394,4078	381,1617	-0,3	-1,2
58	136,1641	2,63	117,3264	381,1623	0,3	1,2
		2,55	G0m =	381,1620	Tol 3,6 mgon	Tol : 20 cm

$Emq = 1,5$ mgon (Tolérance : 2,7 mgon)

$Rmq = 4,6$ cm (Tolérance : 20 cm)

◆ Cheminement : mesures de terrain

Les tableaux suivants donnent les mesures effectuées sur chaque cheminement.

Cheminement (1)		
Sta.	Dr m	Hg gon
52		92,8409
	474,89	
521		235,2414
	479,57	
522		220,6389
	392,24	
523		115,4927
	516,87	
524		250,3862
	506,43	
161		264,6065
Σ	2370	

Cheminement (2)		
Sta.	Dr m	Hg gon
62		323,2331
	391,09	
621		167,1418
	412,73	
622		177,0585
	430,42	
623		253,5204
	560,34	
161		157,1347
Σ	1795	

Cheminement (3)		
Sta.	Dr m	Hg gon
59		57,0602
	424,60	
591		239,7942
	490,40	
592		154,7581
	487,35	
593		243,4975
	455,84	
161		0,0000
Σ	1858	

Les lectures angulaires au point 161 sont réduites à une même référence d'arrivée (point 593), donc :

- pour le cheminement n° 1 : $Hg_{161} = 125,4967 - 260,8902 + 400 = 264,6065$ gon.
- pour le cheminement n° 2 : $Hg_{161} = 125,4967 - 368,3620 + 400 = 157,1347$ gon.
- pour le cheminement n° 3 : $Hg_{161} = 0,0000$ gon.

◆ **Calcul des cheminements**

Les trois tableaux suivants détaillent les calculs de chaque cheminement.

(1)	Gisem. brut	Poids p_j	Ca mgon	Gisement compensé	Delta E m	C_E cm	Delta N m	C_N cm	Li^2 km ²	E m	N m
52	189,9103	2,11	-0,2	189,9101	74,95	0,4	-468,94	-0,7	4,58	984 274,11	175 919,31
521	225,1517	4,19	-0,4	225,1511	-184,57	0,4	-442,63	-0,7	2,82	984 349,07	175 450,37
522	245,7906	4,63	-0,4	245,7896	-258,42	0,3	-295,08	-0,6	1,49	984 164,49	175 007,73
523	161,2833	4,48	-0,4	161,2819	295,33	0,4	-424,19	-0,7	0,88	983 906,08	174 712,65
524	211,6695	3,91	-0,3	211,6678	-92,30	0,4	-497,95	-0,7	0,26	984 201,41	174 288,45
161	276,2760	1,97	-0,2	276,2741						984 109,12	173 790,49
Σ		21,30	-1,9		-165,01	2,1	-2128,78	-3,4	10,0		

(2)	Gisem. brut	Poids p_j	Ca mgon	Gisement compensé	Delta E m	C_E cm	Delta N m	C_N cm	Li^2 km ²	E m	N m
62	321,4190	2,56	0,0	321,4190	-369,16	-2,1	129,11	-0,1	2,82	985 788,83	173 790,53
621	288,5608	4,98	-0,1	288,5607	-406,08	-2,2	-73,76	-0,1	1,74	985 419,65	173 919,64
622	265,6193	4,75	-0,1	265,6191	-369,16	-2,3	-221,31	-0,1	0,83	985 013,54	173 845,88
623	319,1397	4,11	-0,1	319,1394	-535,21	-3,0	165,94	-0,2	0,31	984 644,35	173 624,56
161	276,2744	1,78	0,0	276,2741						984 109,12	173 790,49
Σ		18,18	-0,3		-1679,62	-9,6	-0,03	-0,6	5,7		

(3)	Gisement brut	Poids p_j	Ca mgon	Gisement compensé	Delta E m	C_E cm	Delta N m	C_N cm	Li^2 km ²	E m	N m
59	38,2222	2,36	0,3	38,2225	239,89	1,8	350,34	0,8	3,10	982 743,18	172 683,97
591	78,0164	4,39	0,5							982 983,08	173 034,32
592	32,7745	4,09	0,5	78,0172	461,45	2,1	165,99	0,9	1,85	983 444,56	173 200,32
		32,7758	239,97	2,1	424,18	0,9	0,79				
593	76,2720	4,25	0,5	76,2738	424,55	2,0	165,98	0,8	0,21	983 684,55	173 624,50
161	276,2720	2,19	0,3	276,2741						984 109,12	173 790,49
Σ		17,28	2,1		1365,86	8,1	1106,49	3,3	5,9		

Pour chaque cheminement le gisement de départ est $G_d = G0 +$ lecture sur le premier point.

La compensation angulaire est effectuée sur les gisements bruts (avec cumul des compensations).

◆ Fermetures angulaire et planimétrique des trois cheminements

Les tableaux suivants détaillent les calculs des fermetures angulaires et planimétriques de chaque cheminement.

N°	Garrivée gon	Ta_i mgon	Poids p_j	fa mgon	Tam_i mgon
1	276,2760	7,9	16,1	1,9	6,5
2	276,2744	7,7	16,7	0,3	6,3
3	276,2720	7,7	16,7	-2,1	6,3
	276,2741		49,5		

Le gisement d'arrivée est déduit de la transmission des gisements.

N°	E_{p_j} m	N_{p_j} m	Tp_i cm	Poids p_j	f_E cm	f_N cm	Fp cm	Tpm_i cm
1	984 109,10	173 790,53	29,7	1,14	-2,1	3,4	4,0	25,1
2	984 109,21	173 790,50	26,3	1,45	9,6	0,6	9,6	21,0
3	984 109,04	173 790,46	26,5	1,43	-8,1	-3,3	8,7	21,3
	984 109,12	173 790,49		4,01				

Les coordonnées des points d'arrivée de chaque cheminement sont calculées avec :

$$E_{P_j} = E_{\text{départ}} + \Sigma(\Delta E)$$

$$N_{P_j} = N_{\text{départ}} + \Sigma(\Delta N)$$

Les longueurs L_i intervenant dans le calcul de la tolérance sont calculées au moyen des ΔE et ΔN . Si l'on ne dispose pas d'un tableur, on peut aussi mesurer leur valeur sur un schéma à l'échelle des cheminements.

On peut vérifier que pour les trois cheminements le nombre n de sommets est inférieur à six et la longueur moyenne de l'ordre de 500 m. Les fermetures sont dans les tolérances donc la manipulation est correcte.

2.3.2 Calcul faisant intervenir un *GO* de station au point nodal

Si l'on ajoute au moins deux lectures faites au point nodal 161 sur deux points lointains connus, on peut alors y calculer un *G0moyen* de station. Le calcul doit être alors complété par l'utilisation de ces nouvelles données. À partir des lectures ci-contre, refaites les calculs pour tenir compte de ces nouvelles données.

Points	Lectures gon	Lect. réduites gon
58	12,8461	0,0000
593	125,4967	112,6506
524	260,8902	248,0441
57	302,4708	289,6247
623	368,3620	355,5159

Le tour d'horizon en 161 est réduit à la nouvelle référence qui est le point 58.

◆ *G0moyen* de station en 161

Le tableau suivant détaille le calcul du *G0moyen* de station au point 161.

Station 161	Lectures gon	Distance km	Gisement gon	<i>G0i</i> gon	<i>ei</i> mgon	<i>ri</i> cm
58	0,0000	2,16	163,6257	163,6257	2,0	6,6
57	289,6247	2,94	53,2470	163,6223	-1,4	-6,6
		2,55	<i>G0m</i> =	163,6237	Tol 3,6 mgon	Tol : 20 cm

◆ Nouveau calcul des trois cheminements

Le *G0moyen* d'arrivée au point 161 est maintenant le gisement d'arrivée des trois demi-cheminements. Notez qu'un premier calcul du point nodal est nécessaire pour pouvoir déterminer ce *G0moyen* en 161.

Les gisements de départ sont déduits des *G0moyen* : $G_d = 200 - G_0$, à chaque cheminement. Le dernier angle de gauche est négatif car la lecture avant est égale à zéro :

$$H_g = L_v - L_r = -L_r$$

Les poids p_j et les distances L_i ne sont pas recalculés car ils restent identiques (aux arrondis près pour L_i).

Dans notre exemple, les résultats sont identiques à ceux de la méthode précédente : cela vient du fait que les fermetures angulaires sont faibles.

Les trois tableaux suivants détaillent les calculs de chaque demi-cheminement avec transmission de GO de station.

Sta,	Hg gon	Gisement gon	Ca mgon	Gisement compensé	Delta E m	C _E cm	Delta N m	C _N cm	E m	N m
(1)		297,0694								
52	92,8409		-0,2						984 274,11	175 919,31
		189,9103		189,9101	74,95	0,5	-468,94	-0,7		
521	235,2414		-0,3						984 349,07	175 450,37
		225,1517		225,1512	-184,58	0,5	-442,63	-0,7		
522	220,6389		-0,4						984 164,50	175 007,73
		245,7906		245,7897	-258,42	0,4	-295,08	-0,6		
523	115,4927		-0,4						983 906,08	174 712,65
		161,2833		161,2821	295,33	0,5	-424,19	-0,7		
524	250,3862		-0,3						984 201,41	174 288,45
		211,6695		211,6680	-92,30	0,5	-497,95	-0,7		
161	-248,0441		-0,2						984 109,12	173 790,49
		163,6254		163,6237						
Σ			-1,7		-165,02	2,4	-2128,78	-3,4		
		fa =	1,7	Tol : 7,9	fx =	-2,4	fy =	3,4	fp = 4,17	Tol. : 29,7

Sta,	Hg gon	Gisement gon	Ca mgon	Gisement compensé	Delta E m	C _E cm	Delta N m	C _N cm	E m	N m
(2)		198,1859								
62	323,2331		0,0						985 788,83	173 790,53
		321,4190		321,4190	-369,16	-2,1	129,11	-0,2		
621	167,1418		0,0						985 419,65	173 919,64
		288,5608		288,5608	-406,08	-2,2	-73,76	-0,2		
622	177,0585		0,0						985 013,54	173 845,88
		265,6193		265,6192	-369,16	-2,3	-221,31	-0,2		
623	253,5204		0,0						984 644,35	173 624,56
		319,1397		319,1396	-535,21	-3,0	165,94	-0,3		
161	-355,5159		0,0						984 109,12	173 790,49
		163,6238		163,6237						
Σ			-0,1		-1679,62	-9,6	-0,03	-0,9		
		fa =	0,1	Tol. : 7,7	fx =	9,6	fy =	0,9	fp = 9,60	Tol. : 26,3

Sta,	Hg gon	Gisement gon	Ca mgon	Gisement compensé	Delta E m	C _E cm	Delta N m	C _N cm	E m	N m
(3)		181,1620								
59	57,0602		0,3						982 743,18	172 683,97
		38,2222		38,2225	239,89	1,8	350,34	0,8		
591	239,7942		0,6						982 983,08	173 034,32
		78,0164		78,0173	461,45	2,1	165,99	0,9		
592	154,7581		0,5						983 444,56	173 200,32
		32,7745		32,7760	239,97	2,1	424,17	0,9		
593	243,4975		0,6						983 684,55	173 624,51
		76,2720		76,2740	424,55	1,9	165,98	0,9		
161	-112,6506		0,3						984 109,12	173 790,49
		163,6214		163,6237						
Σ			2,3		1365,86	7,9	1106,49	3,5		
		fa = -2,3		Tol. : 7,7	fx = -7,9		fy = -3,5		fp = 8,65	Tol. : 26,5



Les résolutions précédentes, qui demandent des calculs fastidieux, peuvent être effectuées sur le tableau NODALXY.XLS fourni sur le cédérom de l'ouvrage.

2.3.3 Calcul graphique

Le calcul du point nodal peut être réalisé graphiquement en utilisant les ellipses de tolérance vues au paragraphe 2.2.4. Les calculs du *G0moyen* ne pouvant être réalisés simplement de manière graphique, il faut les déterminer numériquement au préalable. Nous prendrons les résultats du paragraphe 2.3.1.

L'environnement de travail est identique à celui de l'exercice du paragraphe 1.7.2.

◆ Préparation

Nous allons détailler ici un moyen de « personnaliser » AutoCAD LT pour dessiner plus rapidement les trois polygonales aboutissant au point nodal : nous avons vu à l'exercice du paragraphe 1.7.2. qu'un changement de SCU est nécessaire et qu'il se fait par *SCU* ↵ *Objet* ↵ *Dernier* ↵. Cela étant répétitif, nous allons placer cette combinaison de touches sur un bouton de la barre d'outils (ou de la boîte à outils).

Sélectionnez le menu *OUTILS / PERSONNALISATION DES BOITES A OUTILS / NOUVELLE* ; nommez votre barre personnelle puis validez. Modifiez-la ensuite (bouton *MODIFIER*) en y faisant glisser un bouton vide de la catégorie « personnalisé ». Cliquez sur ce nouveau bouton avec le bouton de droite de la souris pour modifier son icône et entrez la commande associée. Choisissez par exemple l'icône ci-contre :



Entrer dans le cadre *MACRO* la macrocommande suivante : **SCU** **OB** **D**

Le caractère représente la touche espace, ce qui est équivalent sur AutoCAD à un appui sur *ENTER* (↵). Validez avec *OK*. Chaque fois que vous cliquerez sur cette case,

AutoCAD alignera le SCU sur la dernière entité dessinée, ce qui permettra de construire facilement une polygonale.

On peut pousser plus loin le raisonnement en ajoutant à la macro les instructions qui permettront de commencer le côté suivant à l'extrémité du précédent :

SCU **OB** **D** **LIGNE** **EXT** **@0,0**

◆ Dessin des cheminements

Placez les trois points de départ 52, 59 et 62 (voir fig. 2.33. et 2.34.).

POINT ↵ 984274.11,175919.31 ↵ puis *POINT* ↵ 982743.18,172683.97 ↵ puis *POINT* ↵ 985788.83,173790.53 ↵

Zoom ↵ *Etendu* ↵ suivi de *Zoom* ↵ 0.8X ↵ (vous pouvez aussi placer cette macrocommande sur un bouton).

Dessin des trois G0 de station calculés en 52, 59 et 62

LIGNE ↵ du point *NODal* de .. (point 52) au point @500<97.0694 ↵

LIGNE ↵ du point *NODal* de .. (point 62) au point @500<398.1859 ↵

LIGNE ↵ du point *NODal* de .. (point 59) au point @500<381.1620 ↵

Dessin du premier cheminement (issu du point 52)

SCU ↵ option *Objet* ↵ cliquez sur la droite partant de 52 et représentant le *G0moyen* : cliquez vers l'extrémité opposée au point 52 de manière à positionner l'axe des X du SCU dans le sens de parcours de la polygonale.

LIGNE ↵ du point *NODal* de... (point 52) au point @474.89<385.0239 ↵ (385.0239 = 85.0239 - 100 + 400)

SCU ↵ *Objet* ↵ *Dernier* ↵ *LIGNE* ↵ du point *EXTrémité* de.. (côté précédent) au point @479.57<135.2414 ↵

Utilisez la macrocommande vue précédemment pour automatiser les entrées des côtés.

(*macro*) au point @392.24<120.6389 ↵

(*macro*) au point @516.87<115.4927 ↵

(*macro*) au point @506.43<250.3862 ↵

Dessin du deuxième cheminement (issu du point 62)

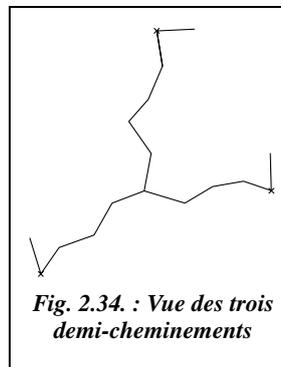
SCU ↵ option *Objet* ↵ cliquer sur la droite partant de 62..

LIGNE ↵ du point *NODal* de .. (point 58) au point @391.09<205.4383 ↵

(*macro*) au point @412.73<67.1418 ↵

(*macro*) au point @430.42<77.0585 ↵

(*macro*) au point @560.34<153.5204 ↵



Dessin du troisième cheminement (issu du point 59)

SCU ↵ option *Objet* ↵ cliquer sur la droite partant du point 59...

LIGNE ↵ du point *NODal* de... (point 59) au point @455.84<343.8141 ↵

(*macro*) au point @487.35<139.7942 ↵

(*macro*) au point @490.4<54.7581 ↵

(*macro*) au point @424.6<143.4975 ↵

Rappel : (*macro*) remplace (SCU ↵ *Ob* ↵ *D* ↵ *L* ↵ *EXT* ↵ @0,0 ↵).

Vous devez obtenir une représentation semblable à la figure 2.34.

◆ Calcul des dimensions des ellipses de tolérance : voir § 1.4.2.1.

- La tolérance de fermeture en longueur est $T_L = 2,7\sqrt{n\sigma_L^2 + \sigma_X^2}$.

L'écart type sur la position d'un point est $\sigma_X = \pm 20 / 2,7$ cm en canevas ordinaire.

L'écart type sur la mesure d'un côté est $\sigma_L \approx \pm 0,4$ cm pour des côtés d'environ 500 m mesurés avec un distancemètre d'écart type $\pm (3 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$.

- La tolérance de fermeture en direction est $T_D = 2,7\sigma_a \sqrt{\sum_1^n Li^2}$

L'écart type sur une lecture d'angle est $\sigma_a \approx \pm 5$ dmgon (avec un théodolite T2).

Chem.	n	T_L (cm)	$\sum Li^2$ (km ²)	T_D (cm)
1	5	20,1	10,03	6,7
2	4	20,1	5,71	5,1
3	4	20,1	5,95	5,2

Le tableau ci-contre donne le détail des calculs des tolérances de fermeture.

◆ Dessin des ellipses de tolérance : Zoom sur la zone du point nodal.

Première ellipse : SCU ↵ option *Objet* ↵, cliquez sur le dernier côté du premier cheminement. ELLIPSE ↵ de Centre ↵ l'EXTrémité du dernier côté du cheminement, extrémité de l'axe @0.220,0 ↵ demi-longueur du deuxième axe : 0.067 ↵

Dessinez de même les deux autres ellipses :

SCU ↵ E ↵ cliquer sur le dernier côté.

ELLIPSE ↵ C ↵ EXT ↵ @0.216,0 ↵ 0.051 ↵

SCU ↵ E ↵ cliquer sur le dernier côté.

ELLIPSE ↵ C ↵ EXT ↵ @0.216,0 ↵ 0.052 ↵

Les trois ellipses ont une zone commune (fig. 2.35.)

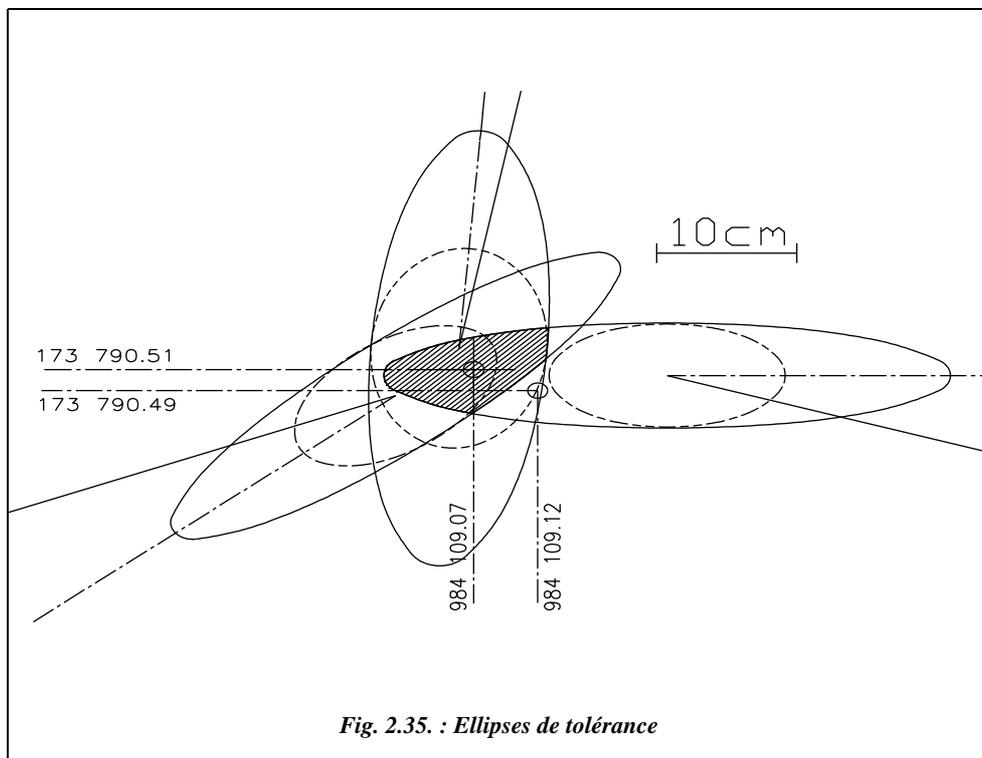


Fig. 2.35. : Ellipses de tolérance

Les ellipses en trait continu correspondent aux tolérances du canevas ordinaire ($T_x = 20$ cm).

Les ellipses en trait discontinu correspondent aux tolérances du canevas de précision (tolérance $T_x = 4$ cm) : on constate qu'elles n'ont pas de zone commune, donc qu'elles sont hors tolérance pour le canevas de précision.

Placement du point nodal

POINT ↴ puis cliquez avec la souris dans la zone commune à l'endroit qui vous semble le plus central. Les coordonnées du point nodal sont : (984 109.07 , 173 790.51) qu'il faut comparer avec le résultat de la détermination numérique (984 109,12 ; 173 790,49), soit environ 5 cm d'écart en planimétrie.

D'après l'allure des ellipses construites pour le canevas ordinaire, on constate que les précisions ne sont pas du tout homogènes en longueur ni en direction : cela vient de l'imprécision sur la connaissance des points d'appui du canevas ordinaire (20 cm). Les ellipses du canevas de précision sont plus homogènes.